

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA ENERGETIKY

Vliv parametrů spalovacího vzduchu na účinnost Flexibilního energetického systému (FES)

Influence of Parameters of Combustion Air For FES Efficiency

Student: Bc. Robert Gurský

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Robert Gurský**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2302T006 Energetické stroje a zařízení**
Téma: **Vliv parametrů spalovacího vzduchu na účinnost Flexibilního energetického systému (FES)**
Influence of Parameters of Combustion Air for FES Efficiency

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte řešení pro FES, rožkové ohniště a účinnost
2. Proveďte stechiometrické výpočty pro rožkové ohniště a černé uhlí
3. Stanovte účinnost kotle a množství paliva
4. Stanovte parametry parovzduchové směsi
5. Stanovte účinnost FES
6. Proveďte analýzu vlivu sání spalovacího vzduchu na účinnost kotle a FESu
7. Vypracujte schéma zapojení FESu pro analýzu vlivu různého sání vzduchu

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T. "Výpočty kotlů a spalinných výměníků. Skripta ČVUT Praha. ISBN 80-01-02591-8.
<http://projekty.fs.vsb.cz/414/?ucebni-opory>
[http](http://)


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilímec**

Datum zadání: 13.12.2014
Datum odevzdání: 18.05.2015


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

„ Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci Vliv parametrů spalovacího vzduchu na účinnost Flexibilního energetického systému vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce.“

V Ostravě.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18.5.2015

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Robert Gurský

Adresa trvalého pobytu autora práce :

Za Humny 10, Rohatec 696 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Gurský, R. *Vliv parametrů spalovacího vzduchu na účinnost Flexibilního energetického systému (FES): diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 2015, 74 stran, Vedoucí práce: Vilimec, L.

Náplní diplomové práce je posouzení vlivu parametrů spalovacího vzduchu na účinnost FES. V teoretické části práce je uveden základní popis FESu, jeho různé varianty využití, a stručný přehled kotlů vhodných pro FES. Praktická část diplomové práce je zaměřena na výpočet účinnosti roštového kotle a výpočet celkové účinnosti FESu. Závěr diplomové práce je následně zaměřen na analýzu vlivu sání spalovacího vzduchu na účinnost kotle a FESu. Diplomová práce je doplněna o projekční schéma FESu pro různé varianty sání spalovacího vzduchu.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Gurský, R. *Influence of Parameters of Combustion Air for FES efficiency: master thesis*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 2015, 74 stran, Vedoucí práce: Vilimec, L.

The content of this thesis is to assess the influence of parameters of the combustion air on the effectiveness of FES. In theoretical part main characteristics of FES, it's using options and brief overview of furnaces suitable for FES are listed. The practical part is focused on grate furnace efficiency calculation and on the overall efficiency of FES calculation. In final part of this thesis the analysis of influence of combustion air suction on furnace efficiency and on FES is performed. Thesis is supplemented by projection scheme of FES in various options of combustion air suction.

Obsah

Použité značení

Zadané výpočtové parametry

1 Úvod.....	16
2 Flexibilní energetický systém	17
2.1 Popis flexibilního energetického systému	18
2.2 Rozdělení FES podle možnosti využití.....	20
2.2.1 Využití odpadního tepla flexibilním energetickým systémem HRFES	20
2.2.2 Flexibilní kogenerační systém FCS	21
2.2.3 Kombinovaný cyklus CCCC	22
2.3 Obecný popis kotle	23
2.3.1 Kotle pro spalování tuhých paliv, druhy ohnišť	23
3 Redukovaná výhřevnost, kontrola stanovené výhřevnosti paliva.....	25
3.1 Kontrola stanovení výhřevnosti	25
3.1.1 Redukovaná výhřevnost paliva.....	26
3.2 Poměrný maximální objem tříatomových plynů	27
4 Stechiometrie	28
4.1 Stechiometrické výpočty.....	28
4.2 Stanovení měrné tepelné kapacity spalín.....	33
4.3 Stanovení entalpie spalín	34
4.3.1 Hustota spalín	34
5 Stanovení obsahu spalitelných látek v pevných zbytcích po spalování.....	38
5.1 Zadané parametry:	38
5.2 Stanovení obsahu spalitelných látek	38
6 Účinnost kotle	40
6.1 Tepelné ztráty kotle	40
6.1.1 Ztráta mechanickým nedopalem	41
6.1.2 Ztráta chemickým nedopalem.....	42
6.1.3 Ztráta sáláním a vedením do okolí.....	42
6.1.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	42
6.1.5 Ztráta citelným teplem spalín (komínová).....	43
6.2 Stanovení účinnosti kotle.....	43
6.2.1 Množství paliva.....	44

7 Struskování	45
7.1 Výpočet náchylnosti paliva k tvorbě nánosů	46
8 Stanovení parametrů parovzduchové směsi	48
8.1 Parovzduchová směs	48
8.2 Výpočet parametrů PVS	49
8.2.1 Hmotnostní koncentrace složek PVS	49
8.2.2 Stanovení parciálních tlaků vodní páry a suchého vzduchu	50
8.2.3 Stanovení entalpie PVS	51
8.2.4 Stanovení Hustoty PVS	52
8.2.5 Stanovení transportních vlastností PVS	52
9 Stanovení účinnosti FES	55
9.1 Bilance roštového kotle o výkonu 120 MW	56
9.2 Bilance Ohříváku parovzduchové směsi	57
9.3 Bilance ohříváku spalovacího vzduchu	58
9.4 Bilance redukční parní turbíny PT1	59
9.5 Bilance kompresoru a plynové turbíny	60
9.6 Bilance HRSG kotle na odpadní teplo PVS	61
9.7 Bilance parní turbíny PT2	62
9.8 Bilance výměníků RGV, ROV1 a ROV2	63
9.9 Vyhodnocení celkové energetické bilance FES	64
10 Analýza vlivu sání spalovacího vzduchu na účinnost kotle a FESu	65
10.1 Vliv sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru ve variantě b) za kondenzátorem PVS na celkovou elektrickou účinnost FES a účinnost kotle	66
10.2 Vliv sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru před kondenzátorem K1 na velikost komínové ztráty a celkové elektrické účinnosti FES. Chyba! Záložka není definována.	
10.2 Vliv sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru za kondenzátorem PVS na velikost komínové ztráty	Chyba! Záložka není definována.
10.3 Vliv sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru před kondenzátorem PVS na celkovou elektrickou účinnost FES	Chyba! Záložka není definována.
10.4 Vliv sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru před kondenzátorem PVS na velikost komínové ztráty	Chyba! Záložka není definována.
11 Závěr	Chyba! Záložka není definována.

Seznam použité literatury	15
Seznam obrázků	16
Seznam tabulek	16
Seznam grafů	17
Seznam zkratek	17
Seznam příloh	18

Použité značení

β	[1]	Objem tříatomových plynů
ν_{sm}	[m ² · s ⁻¹]	Kinematická viskozita PVS
ω_{SO_2}	[%]	Koncentrace oxidu siřičitého ve spalínách
ω_{O_2}	[%]	Koncentrace kyslíku ve spalínách
ω_{N_2}	[%]	Koncentrace dusíku ve spalínách
ω_{H_2O}	[%]	Koncentrace vody ve spalínách
ω_{CO_2}	[%]	Koncentrace oxidu uhličitého ve spalínách
ρ_{sm}	[kg · m ⁻³]	Hustota parovzduchové směsi
$\rho_{sm,N}$	[kg · m ⁻³]	Hustota PVS při normálních podmínkách
ρ_{sp}^t	[kg · m ⁻³]	Hustota spalin při teplotě spalin t_s
ρ_{sp}	[kg · m ⁻³]	Hustota spalin
λ_{vp}	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	Tepelná vodivost vodní páry
λ_{sv}	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	Tepelná vodivost suchého vzduchu
λ_{sm}	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	Tepelná vodivost PVS
η_{vp}	[Pa · s]	Dynamická viskozita vodní páry
η_{sv}	[Pa · s]	Dynamická viskozita suchého vzduchu
η_{sm}	[Pa · s]	Dynamická viskozita PVS
η_k	[%]	Účinnost kotle
$\eta_{FES,celk.}$	[%]	Celková účinnost FES
A	[%]	Součet složek kyselých oxidů v popelu
A ^r	[%]	Procento popeloviny v surovém vzorku paliva
a _s	[%]	Podíl nespálených látek ve strusce vzhledem k celkovému podílu nespálených látek v popelu
B	[%]	Součet složek zásaditých oxidů v popelu

c_{pH_2O}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita vodní páry
c_{pN_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita dusíku
c_{pSO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita oxidu siřičitého
c_{pCO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého
c_{pSP}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita spalín
C_i	[1]	Podíl hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků
c_p	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita popílku
c_{p_str}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná střední tepelná kapacita
C_{pop}	[%]	Obsah spalitelných látek v popílku
C_{str}	[%]	Obsah spalitelných látek ve strusce
d	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Měrná vlhkost vlhkého vzduchu
i_{sm}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie parovzduchové směsi
i_{sv}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie suchého vzduchu
i_{vp}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie vodní páry
$I_S^{t,nk}$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie spalín o teplotě t_s s přebytkem vzduchu α
$I_{s,min}^t$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie stechiometrických spalín při teplotě spalín t_s
K_s	[%]	Koeficient účinnosti spalování
m_{CO_2}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Hmotnostní podíl CO_2 ve spalínách
m_{H_2O}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Hmotnostní podíl H_2O ve spalínách
m_{N_2}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Hmotnostní podíl N_2 ve spalínách
m_{O_2}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Hmotnostní podíl O_2 ve spalínách
m_{SO_2}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Hmotnostní podíl SO_2 ve spalínách
M_{pal}	$[kg \cdot s^{-1}]$	Množství přivedeného paliva
M_V	$[kg \cdot s^{-1}]$	Množství spáleného paliva
\dot{m}_{SPAL}	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní tok spalín

\dot{m}_{SV}	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Množství spalovacího vzduchu
\dot{m}_{NV}	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Množství napájecí vody
$\dot{m}_{VZ,K}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Množství vzduchu do kompresoru
\dot{m}_{PVS}	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Hmotnostní tok PVS
n	$[1]$	Součinitel přebytku vzduchu ve spalovací komoře
n_k	$[1]$	Součinitel přebytku vzduchu za kotlem
$P_{\text{FES,celk.}}$	$[\text{kW}]$	Celkový příkon FES
$P_{\text{el.}}$	$[\text{kW}]$	Celkový elektrický výkon FES
p_k	$[\text{bar}]$	Tlak ve spalínovém kanálu
p_{sv}	$[\text{bar}]$	Parciální tlak suchého vzduchu
p_{vp}	$[\text{bar}]$	Parciální tlak vodní páry
p_{NV}	$[\text{bar}]$	Tlak napájecí vody
$p_{VZ,výstup}$	$[\text{bar}]$	Tlak na výstupu z kompresoru
$Q_{i,\text{red}}^r$	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	Redukovaná výhřevnost paliva
Q_i^r	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	Výhřevnost paliva v surovém stavu
Q_{nc}	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	Výhřevnost uhlíku
Q_V	$[\text{MW}]$	Výrobní teplo
R_p	$[-]$	Kritérium pro posouzení paliva k tvoření popelových nánosů
R_s	$[-]$	Kritérium pro posouzení paliva k tvoření struskových nánosů
t_o	$[\text{°C}]$	Teplota okolí
t_s	$[\text{°C}]$	Teplota spalin
t_{str}	$[\text{°C}]$	Teplota strusky
V_{CO_2}	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Měrný objem oxidu uhličitého
$V_{\text{H}_2\text{O},S}$	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Měrný objem vody ve spalinách

$V_{O_2,min}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální měrný objem spalovacího kyslíku
V_{O_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem kyslíku
V_{SO_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem oxidu siřičitého
V_{Ar}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem argonu
V_{SPS}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem suchých spalin
V_{SPV}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem vlhkých spalin
$V_{VZS,min}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální měrný objem suchého vzduchu
$V_{VZS,skut}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Skutečný měrný objem suchého spalovacího vzduchu
$V_{VZV,min}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální měrný objem vlhkého vzduchu
$V_{VZV,skut}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Skutečný měrný objem vlhkého spalovacího vzduchu
$V_{PVS,N}^{obj}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Objemový průtok PVS za normálních podmínek
\dot{V}_{SPAL}	$[m_N^3 \cdot s^{-1}]$	Objemový průtok spalin
$\dot{V}_{SPAL}^{t_s}$	$[m_N^3 \cdot s^{-1}]$	Objemový průtok spalin při teplotě spalin t_s
$w_{ROO_2,max}$	$[\%]$	Maximální poměrný objem tříatomových plynů
w_{pd}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Koncentrace páry ve vlhkém vzduchu
W^r	$[\%]$	Procento vody v surovém vzorku paliva
w_{vp}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu
w_{sv}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Koncentrace suchého vzduchu v PVS
X_i	$[1]$	Podíl popela v nedopalu
X_{pop}	$[\%]$	Množství popela odváděného jako popílek
X_{str}	$[\%]$	Množství popela odváděného jako struska
z_0	$[\%]$	Nespálené látky
Z_C	$[-]$	Ztráta mechanickým nedopalem
Z_{CO}	$[-]$	Ztráta chemickým nedopalem
Z_{CS}	$[-]$	Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce

$Z_{CÚ}$	$[-]$	Ztráta mechanickým nedopalem v úletu
Z_f	$[-]$	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
Z_K	$[-]$	Ztráta citelným teplem spalin (komínová)
Z_p	$[-]$	Ztráta fyzickým teplem popílku v úletu
Z_s	$[-]$	Ztráta fyzickým teplem strusky
Z_{sv}	$[-]$	Ztráta sáláním a vedením do okolí

Zadané výpočtové parametry

Prvkový rozbor černého uhlí (Polsko-Jankowice), surového vzorku „r“

$$C^r = 61,06 [\%] \quad O^r = 7,21 [\%] \quad H^r = 3,13 [\%] \quad N^r = 1,10 [\%] \quad S^r = 0,5 [\%]$$

$$W^r = 9 [\%] \quad A^r = 18 [\%]$$

Výhřevnost paliva

$$Q_i^r = 23 [\text{MJ/kg}]$$

Chemické složení popela

SiO – 43,74;	Al ₂ O ₃ – 28,58;	Fe ₂ O ₃ – 9,17;
CaO – 4,0;	MgO – 2,73;	Na ₂ O – 1,12;
K ₂ O – 2,96;	SO ₃ – 2,47;	TiO ₂ – 1,04;
P ₂ O ₅ – 1,77;	Mn ₃ O ₄ – 0,05;	BaO – 0,41;
SnO – 0,29;	ZnO – 1,20;	

Přebytek vzduchu ve spalovací komoře

$$n = 1,32 [-]$$

Přebytek vzduchu za kotlem

$$n_k = 1,40 [-]$$

Parametry vzduchu

$$t_o = 20 [^{\circ}\text{C}]$$

$$p_o = 1,0325 [\text{bar}]$$

$$\varphi = 60 [\%]$$

Teplota spalin na výstupu z ohniště

$$t_s = 1177 [^{\circ}\text{C}]$$

Teplota spalin za kotlem

$$t_s = 140 [^{\circ}\text{C}]$$

Množství popela odváděného jako struska a popílek

$$X_{\text{pop}} = 30 [\%]$$

$$X_{\text{str}} = 70 [\%]$$

Obsah spalitelných látek ve strusce

$$C_{\text{str}} = 6 \text{ [\%]}$$

Účinnost spalování spalovacího zařízení

$$K_s = 3 \text{ [\%]}$$

Teplota strusky

$$t_{\text{str}} = 600 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Výrobní teplo kotle

$$Q_v = 120 \text{ [MW]}$$

1 Úvod

V této diplomové práci se zabývám vlivem parametrů spalovacího vzduchu na účinnost Flexibilního energetického systému (FES), a bilančním porovnáním jednotlivých možností nasávání spalovacího vzduchu. Jedná se o energetický systém kombinující paroplynový cyklus při spalování fosilních nebo i alternativních paliv v klasické spalovací komoře, která je chlazená vodou, a následném využití odpadního tepla v kotli HRSG k výrobě páry pro Rankinův parní cyklus. Tento energetický systém vyvíjený firmou Vítkovice Power Engineering bude poté sloužit k výrobě elektřiny, popřípadě ke kogenerační výrobě elektřiny a tepla.

V teoretické části diplomové práce se věnuji popisu FES, a jeho následnému využití ve stávajících, nebo také v nově vzniklých provozech. Dále popisuji vhodnost použití roštových ohnišť pro technologii FES, jejich využití a účinnost. V následující kapitole pokračuji praktickou částí diplomové práce, provádím základní stechiometrické výpočty pro roštová ohniště a černé uhlí. Poté stanovuji účinnost kotle a množství přivedeného paliva. V této části diplomové práce se dostávám ke stanovení parametrů parovzduchové směsi a následnému stanovení celkové účinnosti FES. Výstupem mé diplomové práce je analýza vlivu různých možností sání spalovacího vzduchu na účinnost kotle a celkově i Flexibilního energetického systému. Z konstrukčního hlediska jsem vypracoval schéma zapojení FES a analýzu vlivu různého sání vzduchu. V závěru diplomové práce hodnotím energeticky i ekonomicky výhodnější variantu systému sání spalovacího vzduchu.

2 Flexibilní energetický systém

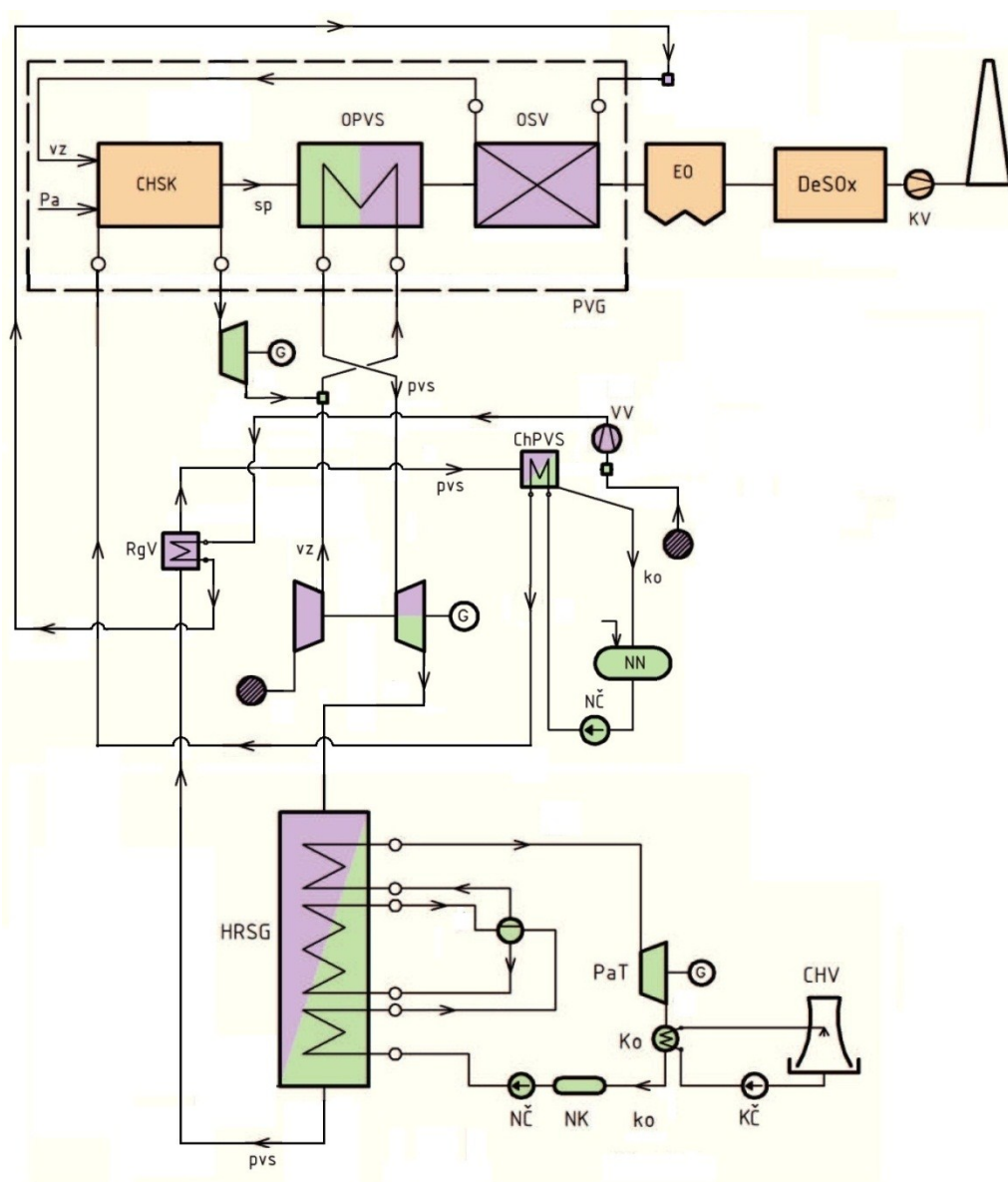
Hlavním důvodem vývoje Flexibilního energetického systému je zvýšení účinnosti přeměny primární chemicky vázané energie fosilních, nebo alternativních paliv, popřípadě biomasy. Systém je založen na kombinaci paroplynového cyklu při spalování paliv v klasické spalovací komoře, která je chlazená vodou, a následném využití odpadního tepla v kotli HRSG k výrobě páry pro Rankinův parní cyklus. Pára vzniklá chlazením spalovací komory je vedena do směšovače páry a vzduchu z kompresoru, následně vzniká tzv. parovzduchová směs (PVS). Tuto směs dále ohříváme v ohříváku parovzduchové směsi (OPVS), na pracovní teplotu cca 850 °C. Tato ohřátá PVS je vedena do plynové turbíny, kde následně expanduje, a dále je využito teplo PVS v kotli na odpadní teplo HRSG, který slouží na výrobu páry pro Rankinův parní cyklus.

Zjednodušeně lze tedy FES charakterizovat jako vlhký oběh s nepřímým ohřevem pracovního média a plynovou turbínou. Pracovním médiem je v tomto případě vzduch a vodní pára. Důvodem použití této parovzduchové směsi je větší entalpický spád i hmotnostní tok na plynové turbíně a tím i větší účinnost. Hlavním zdrojem primární energie pro FES jsou tuhá paliva, zejména fosilní, ale výhodou tohoto systému je adaptace na prakticky jakékoliv palivo. Tedy nejenom tuhá, ale také znečištěná plynná nebo kapalná paliva, odpady, popřípadě může systém využívat teplo odpadních spalin z různých tepelných agregátů.

V takto širokém spektru použitelných paliv se nabízí možnosti použití různých systémů spalování. Základem pro komerční využití je spalovací zařízení s ohništěm tvořeným chlazenou spalovací komorou. Nejčastěji používané řešení je komora tvořena membránovými stěnami zapojenými jako výparník s přirozenou cirkulací. Zde se nabízí možnost použití několika technologií spalování, např: ohniště roštové GF, s bublinkovou fluidní vrstvou BFB, s cirkulující fluidní vrstvou CFB, práškové PCF, a v neposlední řadě ohniště spalující kapalná a plynná paliva G/OF.

2.1 Popis flexibilního energetického systému

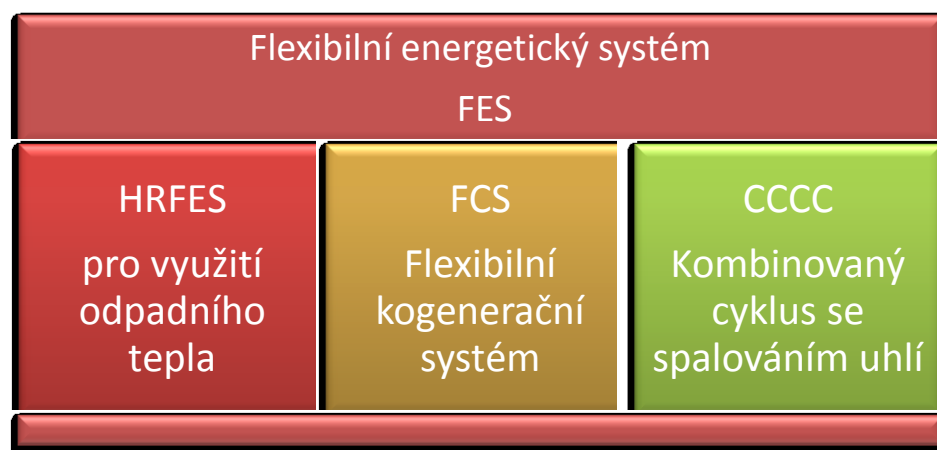
V této podkapitole popisují obecný Flexibilní systém na schématu obr. 2.1, a následné možnosti provedení a použití tohoto systému pro nové i stávající provozy. Flexibilní energetický systém se vyznačuje značnou variabilitou provedení, která zaručuje maximální využití použité technologie. Základním stavebním prvkem FES je parní kotel, který je tvořen klasickou chlazenou spalovací komorou, tvořenou membránovými stěnami. Technologie spalování i použití paliva je značně variabilní, lze použít ohniště na tuhá paliva, kterými jsou práškové, s bublinkovou fluidní vrstvou, s cirkulující fluidní vrstvou, ale také roštové ohniště. Lze také použít zařízení pro spalování plyných a kapalných paliv, nebo i nahradit spalovací komoru za kotel na odpadní teplo.



Obr. 2.1 Schéma FES

Hlavním účelem parního kotle ve FES je výroba syté páry v membránových stěnách kotle, které jsou zapojeny do výparníku s přirozenou cirkulací. Tímto ale podobnost s jinými elektrárenskými zástavbami končí, jelikož následné využití páry se značně liší. Spaliny z kotle jsou dále využity k ohřevu parovzduchové směsi a předehtěvu spalovacího vzduchu, spaliny projdou před vstupem do komínu čištěním s ohledem na použitou technologii spalování a volbu paliva.

Z hlediska dopadu FES na životní prostředí je tento systém srovnatelný s dnes provozovanými nebo vyvíjenými technologiemi pro spalování tuhých a plyných paliv, popřípadě i jiných. Technicky je možné použít i vyvíjený tzv. bezemisní cyklus ve kterém je pro spalování používán kyslík a voda, tudíž nevzniká žádné CO_2 . Jednotlivé možnosti zapojení FES jsem naznačil v obr. 2.2.



Obr. 2.2 Rozdělení podle možného využití FES

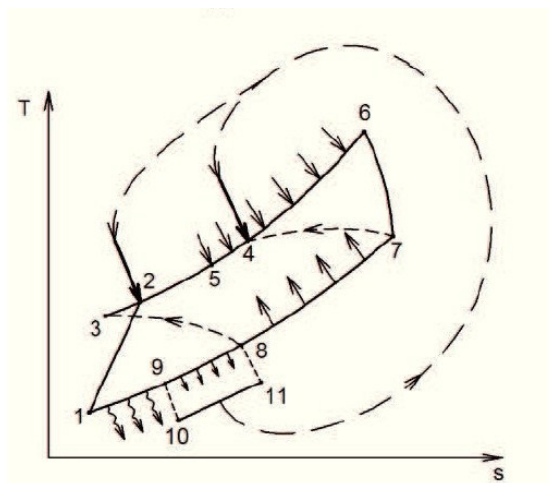
2.2 Rozdělení FES podle možnosti využití

2.2.1 Využití odpadního tepla flexibilním energetickým systémem HRFES

HRFES – Heat Recovery Flexible Energy System, je systém využívající teplo odpadních plynů v průmyslové výrobě, například v hutích, nebo jej lze zařadit mezi tepelné agregáty, jako jsou spalovací motory. Tento systém lze využít jako kogenerační jednotku pro výrobu elektřiny a tepla, nebo jenom pro výrobu elektřiny, která není závislá na dodávce tepla. Zapojení systému HRFES je znázorněno na obr. 2.4, který koresponduje s T-s diagramem na obr. 2.3.

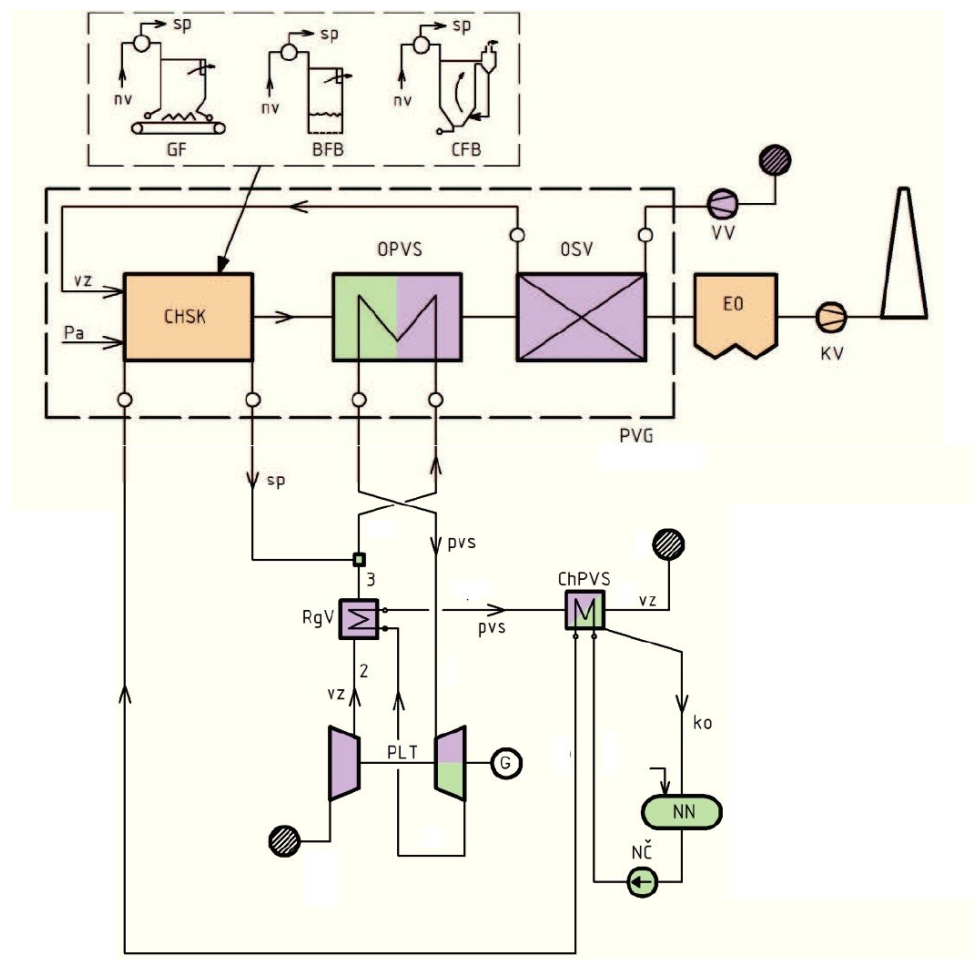
Znázorněný oběh pro využití odpadního tepla tepelného agregátu na obr. 2.4 můžeme rozdělit na dvě základní části. První část schématu je ohraničená oblast, které je znázorněna v horní části schématu, jedná se o parovzduchový generátor. Druhá část schématu je okruh plynové turbíny a přidružených okruhů. Funkci jsem přiblížil v následném popisu.

Na vstupu do kompresoru 1 je nasáván vzduch o teplotě okolí, který je následně stlačen v kompresoru plynové turbíny. Stlačený vzduch 2 se následně ochladí vstřikem kondenzátu 3. Tímto krokem vzniká parovzduchová směs, která pokračuje do regenerativního výměníku *RrV*, kde je následně ohřátá na požadovanou teplotu 4. Do takto ohřáté parovzduchové směsi (pvs) je znovu vstříknut kondenzát na doregulování poměru ve směsi 5. Následuje ohřátí pvs v ohříváku parovzduchové směsi OPVS. Takto ohřátá pvs 6 je následně vedena na lopatky plynové turbíny, kde směs expanduje 7. Vyexpandovaná pvs je následně použita pro ohřátí stlačeného vzduchu v *RgV* ohříváku 8. Parovzduchová směs je následně ochlazena v chladiči pvs, kde dochází ke kondenzaci vody obsažené v pvs. Přebytečný vzduch je vyveden odvětráním 9.



Obr. 2.3 T-s diagram HRFES

Pracovní cyklus FCS se od HRFES liší pouze v použitém zdroji tepla a s tím spojené výrobě pvs. U FCS vzniká pvs stlačováním nasávaného vzduchu v plynové turbíně PLT 2 viz obr. 2.5, a následným ohřevem v RgV 3 je zavedena do směšovače, ve kterém dochází ke směšování se sytou parou, jež je přiváděna z bubnu parního kotle. Dále už je princip oběhu stejný jako HRFES, popisovaný v kap. 2.2.1.



Obr. 2.5 Schématické zapojení FCS

2.2.3 Kombinovaný cyklus CCCC

CCCC – Coal Combustion Combi Cycle, je kombinovaný paroplynový cyklus, který se zaměřuje na spalování uhlí. Kombinovaný cyklus využívá, stejně jako v předchozím řešení, kombinaci Braytonova a Rankin-Clausiova parního cyklu s tou výjimkou, že tento systém lze použít i pro největší elektrárenské bloky. Základní schéma tohoto cyklu je téměř stejné jako v kap. 2.2.2.

2.3 Obecný popis kotle

Kotel je zařízení produkující tlakovou páru, nebo horkou vodu, pro otopné, technologické, nebo energetické účely. Obecně se kotel skládá z následujících částí:

- *Spalovací zařízení a jeho příslušenství* – ohniště, hořáky, rošt, ohříváky vzduchu, sací a vzduchové ventilátory, zařízení, které odvádí tuhé zbytky po spalování, a mlýnice.
- *Výměňiková část* – zde dochází k ohřátí vody, popřípadě k odpaření vody a následnému přehřívání vzniklé páry.

Speciálním případem jsou takzvané kotle na odpadní teplo, které se také nazývají utilizační kotle. U těchto kotlů chybí spalovací zařízení. Spaliny, přicházející do kotle jako odpadní produkt z cizího zdroje, představují teplotonosné médium. Příkladem takového zařízení je kotel HRSG u plynové turbíny.

2.3.1 Kotle pro spalování tuhých paliv, druhy ohnišť

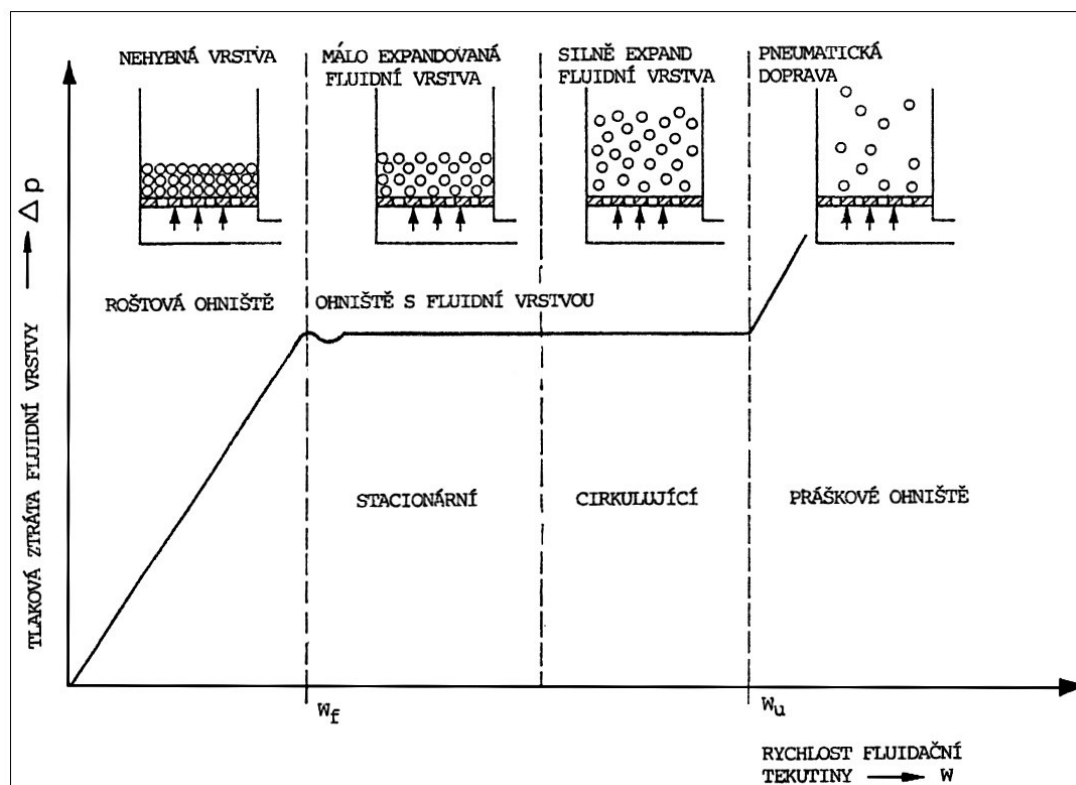
Dělení kotlů podle způsobu spalování a druhu ohniště

Pro spalování tuhých paliv jsou vhodná a běžně používaná ohniště se spalováním:

- *na roštu* - takzvané roštové ohniště, dodnes nejjednodušší způsob spalování tuhých paliv. Z hlediska způsobu obsluhy a jejich funkčního principu je dále můžeme rozdělit na kotle s pevným rostem a kotle s mechanickým rostem,
- *ve fluidní vrstvě* - neboli fluidní ohniště. V tomto typu ohniště lze spalovat stejné druhy tuhých paliv jako u práškových nebo roštových kotlů. Základní rozdělení kotlů podle rychlosti v ohništi je zobrazeno na obr. 2.4. Podle tohoto hlediska dělíme kotle s fluidním ohništěm na dva základní typy, a to na kotle se stacionární fluidní vrstvou, neboli bublinkovou, a kotle s cirkulující fluidní vrstvou,
- *ve vznosu* - neboli práškové ohniště. Tuto metodu dodnes řadíme k nejpoužívanějším technologiím v průmyslové energetice, a to jak při výrobě tepla, tak i elektřiny. Z hlediska způsobu odvodu strusky z ohniště a technologie spalování uhelného prášku rozdělujeme dále tyto kotle na kotle s granulačním ohništěm a kotle s výtavným ohništěm,

Pro znázornění z hlediska principu je zajímavé dělení ohniště podle rychlosti proudění plynu v ohništi (viz obr. 2.6). Na obrázku je zjednodušeně znázorněný vznik fluidní vrstvy. V nádobě na roštu, která se nachází vlevo nad křivkou, je nejdříve nehybná vrstva zrnitého materiálu. Poté, co se pod rošt přivádí vzduch, takzvaná fluidační tekutina, se s rostoucím množstvím a také rychlostí vzduchu zvyšuje tlaková ztráta nehybné vrstvy materiálu. Po

dosažení tzv. prahové rychlosti fluidace W_f , začnou částice materiálu fluidovat, tím vznikne fluidní vrstva, a částice se ocitnou v silové rovnováze.



Obr. 2.6 Rozdělení ohnišť podle rychlosti proudění plynu [3]

Při dalším zvyšování průtoku vzduchu fluidní vrstva začne expandovat, přičemž se tlaková ztráta fluidní vrstvy nemění. Pokud rychlost průtoku vzduchu dosáhne hodnoty prahové rychlosti úletu W_u , fluidní vrstva zaniká a začíná pneumatické dopravování do prostoru ohniště. Při zvyšování rychlosti nad hodnotu prahové rychlosti úletu W_u se zvyšuje i tlaková ztráta.

3 Redukovaná výhřevnost, kontrola stanovené výhřevnosti paliva

3.1 Kontrola stanovení výhřevnosti

Kontrolu složení paliva podle kalorimetricky stanovené výhřevnosti paliva jsem provedl porovnáním s výhřevností stanovenou z prvkového rozboru pomocí Mendělejevova vzorce (rovnice 3.1).

Rozdíl hodnot takto stanovené výhřevnosti nesmí převyšovat ± 630 kJ/kg, pro palivo s obsahem popela v bezvodném stavu $A^d \leq 25\%$.

$$Q_i^r = 339 \cdot C^r + 1030 \cdot H^r - 109 \cdot (O^r - S^r) - 24,5 \cdot W^r \text{ [kJ/kg]} \quad (\text{rovnice 3.1})$$

$$Q_i^r = 339 \cdot 0,6106 + 1030 \cdot 0,0313 - 109 \cdot (0,0721 - 0,005) - 24,5 \cdot 0,09$$

$$Q_i^r = 23195,89 \text{ [kJ/kg]}$$

Zadané parametry paliva:

Q_i^r	23000 kJ/kg	A^r	0,18
H^r	0,0313	W^r	0,09
S^r	0,005	F^r	0
C^r	0,6106	N^r	0,011
O^r	0,0721	Cl^r	0

Vypočtené parametry po korekci paliva:

Q_i^r	23195,89 kJ/kg	A^r	0,18
H^r	0,0363	W^r	0,09
S^r	0,005	F^r	0
C^r	0,6029	N^r	0,011
O^r	0,0748	Cl^r	0

Výsledek: $23195,89 \rightarrow 23000 \pm 630$ kJ/kgvyhovuje

Výsledná vypočtená výhřevnost $Q_i^r=23195,89$ se neliší od kalorimetricky stanovené výhřevnosti paliva v surovém stavu o více než ± 630 kJ/kg. V tomto případě již nemusíme prvkový rozbor dále korigovat.

3.1.1 Redukovaná výhřevnost paliva

Redukovaná výhřevnost $Q_{i,red}^r$ bude navýšena o teplo přivedené do spalovací komory ve formě předehřátého spalovacího vzduchu, ohřátého v regeneračním výměníku parovzduchovou směsí. Dále pak výhřevnost Q_i^r , nebude navyšována, jelikož na zařízení nebude instalována suška paliva, recirkulace spalin ani ofukování stěn parou.

Spalovací vzduch bude předehříván pomocí PVS, kdy nasávaný vzduch o teplotě 20 [°C] a tlaku okolí 101,325 [kPa] bude předehříván PVS na teplotu $t_{vz}=80$ [°C]. Entalpie vzduchu za daných teplot jsem vypočetl v programu EES pomocí procedury:

$\text{delta}_i = (\text{Enthalpy}(\text{Air_ha}; T=t_2; P=p_b) - \text{Enthalpy}(\text{Air_ha}; T=t_1; P=p_b))$

$$Q_{i,red}^r = Q_i^r + \Delta i \text{ [kJ/kg]} \quad (\text{rovnice 3.2})$$

$$Q_{i,red}^r = 23195,89 + 60,47$$

$$Q_{i,red}^r = 23256,36 \text{ [kJ/kg]}$$

3.2 Poměrný maximální objem tříatomových plynů

Maximální poměrný objem tříatomových plynů stanovený podle vzorce (rovnice 3.4) musí odpovídat rozmezí hodnot uvedených v tab. 3.1. V případě že hodnoty maximálního poměrného objemu nebudou v rozmezí udávaného hodnotami v tabulce, musí proběhnout korekce paliva s ohledem na kontrolu rozdílu výhřevnosti.

$$\beta = \frac{2,37 \cdot (H^r - 0,125 \cdot O^r)}{C^r + 0,375 \cdot S^r} [1] \quad (\text{rovnice 3.3})$$

$$\beta = \frac{2,37 \cdot (0,0363 - 0,125 \cdot 0,0748)}{0,6029 + 0,375 \cdot 0,005}$$

$$\beta = 0,105612 [1]$$

$$\omega_{RO2_{max}} = \frac{21}{(1 + \beta)} [\%] \quad (\text{rovnice 3.4})$$

$$\omega_{RO2_{max}} = \frac{21}{(1 + 0,105612)}$$

$$\omega_{RO2_{max}} = 18,994 [\%]$$

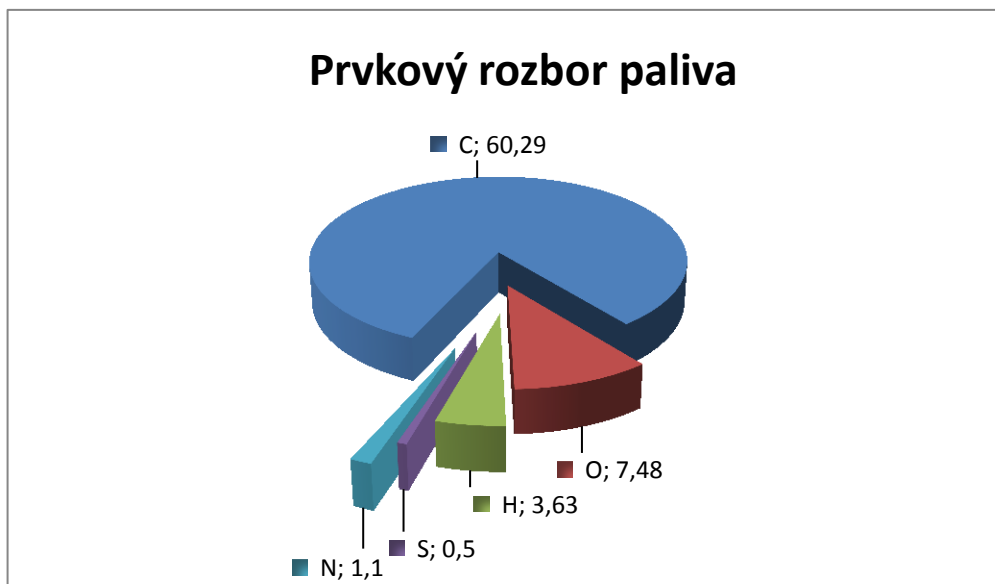
Palivo	$\omega_{RO2_{max}}$
Antracity a poluantracity	19,0 – 20,0
Černá uhlí	18,4 – 19,0
Hnědá uhlí a lignity	18,8 – 19,3
Těžký topný olej	16,2 – 16,7

Tab. 3.1 Doporučené hodnoty maximálního poměru objemu tříatomových plynů pro pevná a kapalná paliva [2]

Po provedení výpočtu maximálního objemu tříatomových plynů a následném porovnání s doporučenými tabelovanými hodnotami bylo zjištěno, že poměrný objem tříatomových plynů vyhovuje pro zvolené výpočtové palivo.

4 Stechiometrie

Tyto výpočty jsou zpracovány na základě literatury [1]. Stechiometrický výpočet byl aplikován na již korigované palivo (viz graf. 4-1) z předchozí kapitoly 2.1, které bude použito na všechny následující výpočty.



Graf 4-1 Prvkový rozbor paliva

4.1 Stechiometrické výpočty

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2, \min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.1})$$

$$V_{O_2, \min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,6029}{12,01} + \frac{0,0363}{4,032} + \frac{0,005}{32,06} - \frac{0,0748}{32} \right)$$

$$V_{O_2, \min} = 1,280 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{VZS, \min} = \frac{V_{O_2, \min}}{0,21} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.2})$$

$$V_{VZS, \min} = \frac{1,280}{0,21}$$

$$V_{VZS, \min} = 6,070 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

Pro běžné klimatické podmínky volím podíl vodní páry připadající na 1 m_N³ suchého vzduchu vyjádřené součinitelem $\nu = 1,014$, který odpovídá přibližně relativní vlhkosti vzduchu $\varphi = 60$ [%] při teplotě $t_o = 20$ [°C] a tlaku 1,0325 [bar].

$$V_{VZV,min} = \nu \cdot V_{VZS,min} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.3})$$

$$V_{VZV,min} = 1,014 \cdot 6,070$$

$$V_{VZV,min} = 6,155 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečný objem suchého vzduchu pro 1 kg paliva

Přebytek vzduchu $n=1,32$ [–]

$$V_{VZS,skut} = n \cdot V_{VZS,min} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.4})$$

$$V_{VZS,skut} = 1,32 \cdot 6,070$$

$$V_{VZS,skut} = 8,0135 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečný objem vlhkého vzduchu pro 1 kg paliva

$$V_{VZV,skut} = \nu \cdot V_{VZS,skut} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.5})$$

$$V_{VZV,skut} = 1,014 \cdot 8,0135$$

$$V_{VZV,skut} = 8,125 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečný objem spalín při spálení 1 kg paliva

Objem oxidu uhličitého

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{\text{VZS,skut}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.6})$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot 0,6029 + 0,0003 \cdot 8,0135$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,117 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem oxidu siřičitého

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.7})$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,005$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,003 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem dusíku

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{\text{VZS,skut}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.8})$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot 0,0011 + 0,7805 \cdot 8,0135$$

$$V_{\text{N}_2} = 6,337 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem kyslíku

$$V_{\text{O}_2} = 0,2195 \cdot (n - 1) \cdot V_{\text{VZS,skut}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.9})$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,2195 \cdot (1,32 - 1) \cdot 8,0135$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,408 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem suchých spalin vzniklých spálením 1kg paliva

$$V_{\text{SPS,skut}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \text{ [m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.10})$$

$$V_{\text{SPS,skut}} = 1,117 + 0,003 + 6,337 + 0,408$$

$$V_{\text{SPS,skut}} = 7,866 \text{ [m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem vodní páry ve spalinách

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,41}{18,015} \cdot W^r + (\vartheta - 1) \cdot V_{\text{VZS,skut}} \text{ [m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.11})$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,0363 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,09 + (1,014 - 1) \cdot 8,0135$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,627 \text{ [m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem vlhkých spalin vzniklých spálením 1 kg paliva

$$V_{\text{SPV,skut}} = V_{\text{SPS,skut}} + V_{\text{H}_2\text{O}} \text{ [m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.12})$$

$$V_{\text{SPV,skut}} = 7,866 + 0,627$$

$$V_{\text{SPV,skut}} = 8,493 \text{ [m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Procentní složení skutečných spalin vzniklých spálením 1 kg paliva

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{SPV,skut}}} \cdot 100 = \frac{1,117}{8,493} \cdot 100 = 13,15[\%] \quad (\text{rovnice 4.13})$$

$$\omega_{\text{SO}_2} = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{\text{SPV,skut}}} \cdot 100 = \frac{0,003}{8,493} \cdot 100 = 0,040[\%] \quad (\text{rovnice 4.14})$$

$$\omega_{\text{N}_2} = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{SPV,skut}}} \cdot 100 = \frac{6,337}{8,493} \cdot 100 = 74,60 [\%] \quad (\text{rovnice 4.15})$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{SPV,skut}}} \cdot 100 = \frac{0,627}{8,493} \cdot 100 = 7,38 [\%] \quad (\text{rovnice 4.16})$$

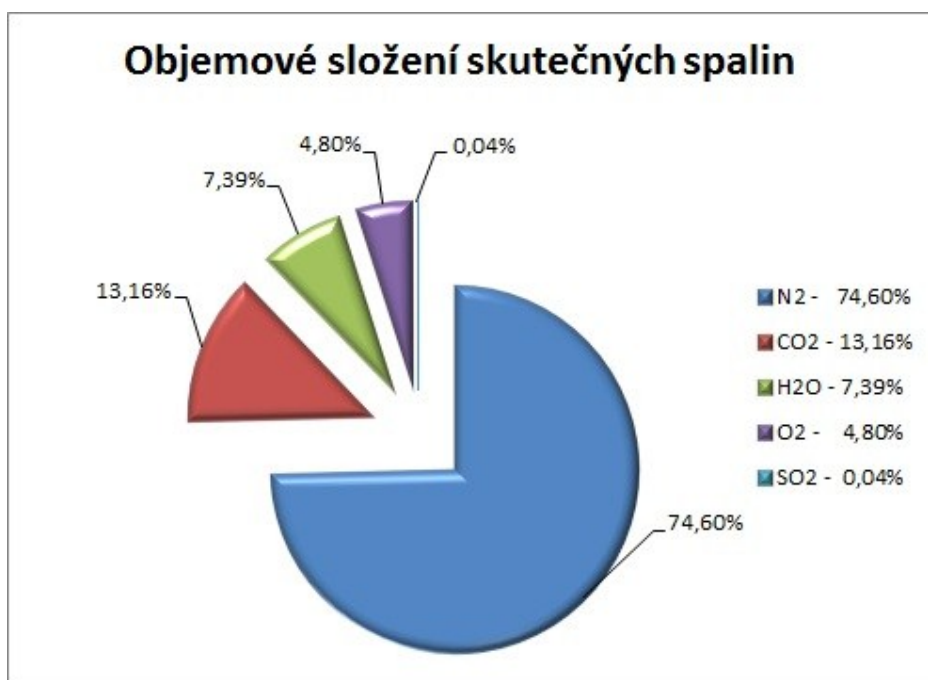
$$\omega_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{SPV,skut}}} \cdot 100 = \frac{0,408}{8,493} \cdot 100 = 4,80 [\%] \quad (\text{rovnice 4.17})$$

Pro kontrolu:

$$\sum \omega = \omega_{\text{CO}_2} + \omega_{\text{SO}_2} + \omega_{\text{N}_2} + \omega_{\text{H}_2\text{O}} + \omega_{\text{O}_2}$$

$$\sum \omega = 13,15 + 0,040 + 74,60 + 7,38 + 4,80$$

$$\sum \omega = 100$$



Graf 4-3 Objemové složení skutečných spalin

Objem spalin z 1kg paliva při teplotě $t_s = 140$ [°C], s přebytkem vzduchu $n_k=1,4$

$$V_{SPV,skut}^t = V_{SPV,skut} \cdot \frac{273,15 + t_s}{273,15} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.18})$$

$$V_{SPV,skut}^t = 8,493 \cdot \frac{273,15 + 140}{273,15}$$

$$V_{SPV,skut}^t = 12,846 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

4.2 Stanovení měrné tepelné kapacity spalin

Ke stanovení měrné tepelné kapacity spalin jsem použil odečet z tab. 4.9 z literatury [1], zadaná teplota spalin $t_s = 140$ [°C]. Pro co nejpřesnější určení měrných tepelných kapacit základních složek spalin jsem použil interpolační metodu.

$$c_{p_{CO_2}} = \frac{1,7863 - 1,6996}{200 - 100} \cdot (140 - 100) + 1,6996 = 1,7343 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.19})$$

$$c_{p_{SO_2}} = \frac{1,9427 - 1,8631}{200 - 100} \cdot (140 - 100) + 1,8631 = 1,8949 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.20})$$

$$c_{p_{O_2}} = \frac{1,3372 - 1,3193}{200 - 100} \cdot (140 - 100) + 1,3193 = 1,3265 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.21})$$

$$c_{p_{H_2O}} = \frac{1,5227 - 1,5062}{200 - 100} \cdot (140 - 100) + 1,5062 = 1,5128 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.22})$$

$$c_{p_{N_2}} = \frac{1,2994 - 1,2951}{200 - 100} \cdot (140 - 100) + 1,2951 = 1,2968 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.23})$$

$$c_{p_{SP}} = c_{p_{SP}} \cdot \omega_{CO_2} + c_{p_{SO_2}} \cdot \omega_{SO_2} + c_{p_{N_2}} \cdot \omega_{N_2} + c_{p_{H_2O}} \cdot \omega_{H_2O} + c_{p_{O_2}} \cdot \omega_{O_2} \quad (\text{rovnice 4.24})$$

$$c_{p_{SP}} = 1,7343 \cdot 0,1315 + 1,8949 \cdot 0,000402 + 1,3265 \cdot 0,04809 + 1,5128 \cdot 0,07386 \\ + 1,2968 \cdot 0,7460$$

$$c_{p_{SP}} = 1,3718 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

4.3 Stanovení entalpie spalin

Pro stanovení entalpie spalin jsem použil literatury [1], Hustota složek spalin byla odečtena z tab. 4-6 literatury [1].

4.3.1 Hustota spalin

Hustota základních složek spalin je znázorněna v tab. 4.1.

Název složky	Hustota ρ [kg/m_N^3]
ρ_{CO_2}	1,9768
ρ_{H_2O}	0,8058
ρ_{O_2}	1,4289
ρ_{SO_2}	2,9262
ρ_{N_2}	1,2504

Tabulka 4.1 - hustota základních složek spalin

$$\rho_{SP} = \frac{\rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2} + \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + V_{O_2} \cdot \rho_{O_2} + V_{SO_2} \cdot \rho_{SO_2} + V_{N_2} \cdot \rho_{N_2}}{V_{SPV,skut}} \left[\frac{kg^3}{m_N} \right] \quad (\text{rovnice 4.25})$$

$$\rho_{SP} = \frac{1,9768 \cdot 1,117 + 0,8058 \cdot 0,627 + 1,4289 \cdot 0,408 + 2,9262 \cdot 0,003 + 1,2504 \cdot 6,34}{8,493}$$

$$\rho_{SP} = 1,3226 \text{ } [kg/m_N^3]$$

Hustota spalin při teplotě $t_s = 1177$ [°C]

$$\rho_{SP}^{t_s} = \frac{\rho_{SP} \cdot 273,15}{(273,15 + t_s)} \text{ } [kg/m_N^3] \quad (\text{rovnice 4.26})$$

$$\rho_{SP}^{t_s} = \frac{1,3226 \cdot 273,15}{(273,15 + 1177)}$$

$$\rho_{SP}^{t_s} = 0,2490 \text{ } [kg/m_N^3]$$

Objemový průtok spalin za normálních podmínek

$$\dot{V}_{SPAL} = M_v \cdot V_{SPV,skut} \text{ } [m_N^3/s] \quad (\text{rovnice 4.27})$$

$$\dot{V}_{SPAL} = 5,66 \cdot 8,493$$

$$\dot{V}_{SPAL} = 49,076 \text{ } [m_N^3/s]$$

Objemový průtok spalin při teplotě $t_s = 1177$ [°C]

$$\dot{V}_{SPAL}^{t_s} = \frac{\dot{V}_{SPAL} \cdot (273,15 + 1177)}{273,15} \quad [m^3/s] \quad (\text{rovnice 4.28})$$

$$\dot{V}_{SPAL}^{t_s} = \frac{49,076 \cdot 413,15}{273,15}$$

$$\dot{V}_{SPAL}^{t_s} = 260,54 \quad [m^3/s]$$

Hmotností tok spalin

$$\dot{m}_{SPAL} = \dot{V}_{SPAL} \cdot \rho_{SP} \quad [kg/s] \quad (\text{rovnice 4.29})$$

$$\dot{m}_{SPAL} = 49,076 \cdot 1,3226$$

$$\dot{m}_{SPAL} = 63,57 \quad [kg/s]$$

Hustota základních složek spalin při teplotě $t_s = 1177$ [°C] a tlaku $p_k = 0,98$ [bar]

Hustota základních složek spalin při teplotě $t_s = 1177$ [°C] a tlaku $p_k = 0,98$ [bar] byla vypočtena pomocí softwaru EES a je znázorněna v tab. 4.2.

Název složky	Hustota ρ [kg/m ³]
ρ_{CO_2}	0,3577
ρ_{H_2O}	0,1464
ρ_{O_2}	0,2601
ρ_{SO_2}	0,5207
ρ_{N_2}	0,2277

Tabulka 4.2 - hustota základních složek spalin pro t_s a p_k

Stanovení podílu jednotlivých základních složek spalin

$$\frac{\rho_{CO_2}^{t_s}}{\rho_{SP}^{t_s}} = \frac{0,3577}{0,2490} = 1,437 \quad [-] \quad (\text{rovnice 4.30})$$

$$\frac{\rho_{H_2O}^{t_s}}{\rho_{SP}^{t_s}} = \frac{0,1464}{0,2490} = 0,5881 \quad [-] \quad (\text{rovnice 4.31})$$

$$\frac{\rho_{O_2}^{t_s}}{\rho_{SP}^{t_s}} = \frac{0,2601}{0,2490} = 1,045 \quad [-] \quad (\text{rovnice 4.32})$$

$$\frac{\rho_{SO_2}^{t_s}}{\rho_{SP}^{t_s}} = \frac{0,5207}{0,2490} = 2,091 \quad [-] \quad (\text{rovnice 4.33})$$

$$\frac{\rho_{N_2}^{t_s}}{\rho_{SP}^{t_s}} = \frac{0,2277}{0,2490} = 0,9144 \quad [-] \quad (\text{rovnice 4.34})$$

Stanovení hmotnostního podílu jednotlivých základních složek spalin

$$m_{CO_2} = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{SP}} \cdot \omega_{CO_2} = 1,437 \cdot 0,1316 = 0,1891 [kg/kg] \quad (\text{rovnice 4.35})$$

$$m_{H_2O} = \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{SP}} \cdot \omega_{H_2O} = 0,5881 \cdot 0,0739 = 0,0435 [kg/kg] \quad (\text{rovnice 4.36})$$

$$m_{O_2} = \frac{\rho_{O_2}}{\rho_{SP}} \cdot \omega_{O_2} = 1,045 \cdot 0,0481 = 0,0502 [kg/kg] \quad (\text{rovnice 4.37})$$

$$m_{SO_2} = \frac{\rho_{SO_2}}{\rho_{SP}} \cdot \omega_{SO_2} = 2,091 \cdot 0,0004 = 0,0008 [kg/kg] \quad (\text{rovnice 4.38})$$

$$m_{N_2} = \frac{\rho_{N_2}}{\rho_{SP}} \cdot \omega_{N_2} = 0,9144 \cdot 0,7460 = 0,6821 [kg/kg] \quad (\text{rovnice 4.39})$$

Stanovení entalpie základních složek spalin při dané teplotě

Výpočet entalpie daných složek spalin jsem provedl ve výpočtovém softwaru EES pro teplotu $t_s = 1177 [^{\circ}C]$. Entalpii popílku jsem zvolil pomocí interpolace z tab. 4-7 literatury [1]. Hodnoty entalpie jsou uvedeny v tab. 4.3.

Název složky	Entalpie i [kJ/kg]
i_{CO_2}	1356
i_{H_2O}	2593
i_{O_2}	1234
i_{SO_2}	941,8
i_{N_2}	1334
i_{pop}	1209,18

Tabulka 4.3 - entalpie základních složek spalin pro t_s a p_s

Stanovení entalpie stechiometrických spalin při teplotě $t_s = 1177 [^{\circ}C]$

$$I_{s,min}^t = m_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + m_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + m_{O_2} \cdot i_{O_2} + m_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + m_{N_2} \cdot i_{N_2} + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop} [kJ/kg] \quad (\text{rovnice 4.40})$$

$$I_{s,min}^t = 0,1891 \cdot 1356 + 0,0435 \cdot 2593 + 0,0502 \cdot 1234 + 0,0008 \cdot 941,8 + 0,6821 \cdot 1334 + 0,25 \cdot 0,18 \cdot 1209,18$$

$$I_{s,min}^t = 1396,25 [kJ/kg]$$

Stanovení entalpie spalín o teplotě $t_s = 1177$ [°C] s přebytkem vzduchu n

Výpočet entalpie spalín s přebytkem vzduchu $n=1,32$ [-] a teplotou spalín $t_s = 1177$ [°C] jsem provedl na základě literatury [1], entalpii spalovacího vzduchu i_V^t [kJ/kg] jsem vypočetl v programu EES.

$$I_s^{t,n} = I_{s,min}^t + (n - 1) \cdot i_V^t \text{ [kJ/kg]} \quad (\text{rovnice 4.41})$$

$$I_s^{t,n} = 1396,25 + (1,32 - 1) \cdot 353,9$$

$$I_s^{t,n} = 1509,49 \text{ [kJ/kg]}$$

5 Stanovení obsahu spalitelných látek v pevných zbytcích po spalování

Obsah spalitelných látek ve strusce a popílku je určen účinností spalování, kterou stanovuje dodavatel ohniště nebo hořáků. Množství popela odváděného ve formě strusky a popílku určí rovněž dodavatel kotle, který v závislosti na zadané účinnosti spalování stanoví odpovídající obsah spalitelných látek ve strusce a v popílku.

Analýza obsahu spalitelných látek je zde provedena pro moderní roštové ohniště na černé uhlí s velkou výhřevností. Pro analýzu obsahu spalitelných látek jsem zvolil, po konzultaci s vedoucím práce, účinnost spalování K_s 3 [%] pro zařízení, které spalují palivo s velkou výhřevností, především černé uhlí.

5.1 Zadané parametry:

$$K_s = 3 \quad [\%]$$

$$Q_{nc} = 32,7 \quad [\text{MJ/kg}]$$

$$C_{str} = 6 \quad [\%]$$

$$X_{str} = 70 \quad [\%]$$

$$X_{pop} = 30 \quad [\%]$$

5.2 Stanovení obsahu spalitelných látek

$$a_s = \frac{C_{str} \cdot X_{str}}{100 - C_{str}} \quad [\%] \quad (\text{rovnice 5.1})$$

$$a_s = \frac{6 \cdot 70}{100 - 6}$$

$$a_s = 4,46 \quad [\%]$$

$$z_0 = \frac{100 \cdot K_s \cdot Q_{nr}}{Ar \cdot Q_{nc}} \quad [\%] \quad (\text{rovnice 5.2})$$

$$z_0 = \frac{100 \cdot 3 \cdot 23,2563}{18 \cdot 32,7}$$

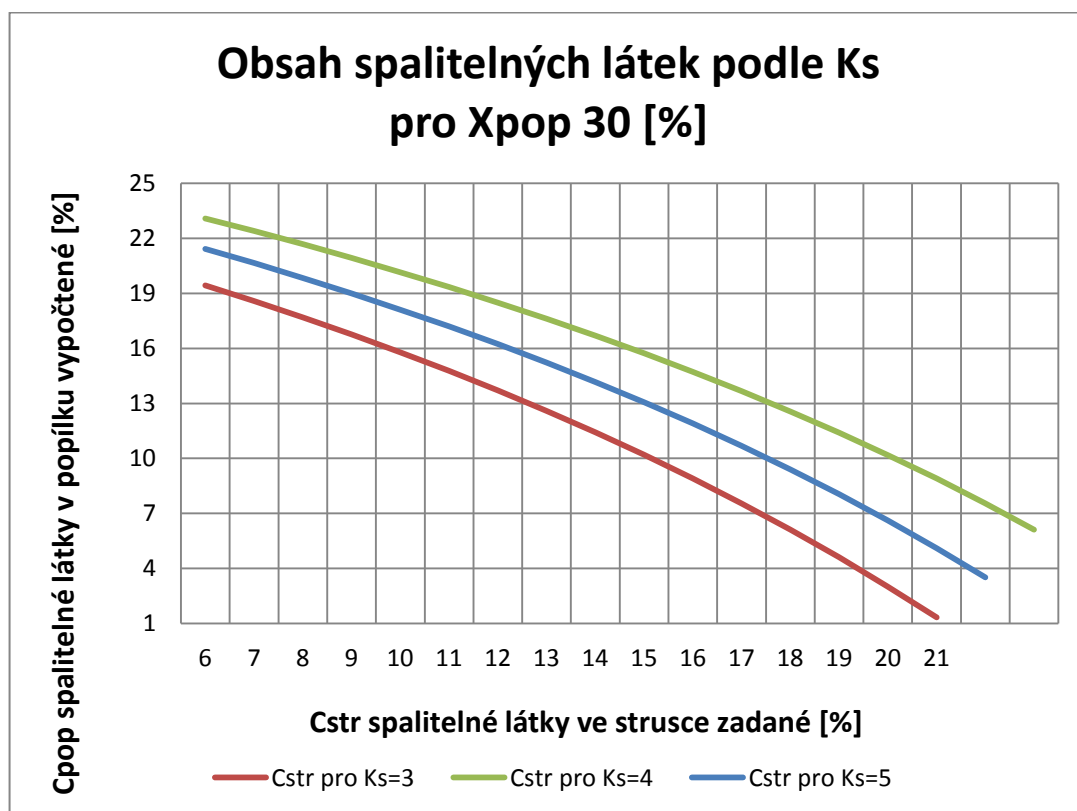
$$z_0 = 11,85 \quad [\%]$$

$$C_{pop} = \frac{100 \cdot (z_0 - a_s)}{X_{pop} + z_0 - a_s} [\%] \quad (\text{rovnice 5.3})$$

$$C_{pop} = \frac{100 \cdot (11,85 - 4,46)}{30 + 11,85 - 4,46}$$

$$C_{pop} = 19,92 [\%]$$

Po stanovení obsahu spalitelných látek v popílku jsem pomocí modelového výpočtu v programu Microsoft Excel vypočetl charakteristiky obsahu spalitelných látek v popílku v závislosti na účinnosti spalování K_s a hodnoty jsem zanesl do grafu 5-1.



Graf 5-1 Obsah spalitelných látek podle K_s , pro X_{pop} 30[%]

6 Účinnost kotle

Účinnost transformace energie je z technicko-ekonomického hlediska jedním z nevýznamnějších parametrů spalovacího zařízení a udává míru využití energie paliva. Energie, která při transformaci nebude využita, představuje ztráty, které mohou být ve formě tepla nebo nespáleného paliva. Obecně je účinnost definována jako poměr výkonu ku příkonu. V uvažovaném případě bude příkonem vždy energie, dodaná do spalovacího zařízení v palivu, a výkonem bude výrobní teplo, které musíme dodat vstupující vodě, abychom získaly výstupní páru o daných parametrech.

Zatímco výrobní teplo si můžeme jednoznačně stanovit, tak příkon při spalování uhlí definovat neumíme. Proto jsem pro výpočet účinnosti kotle zvolil metodu stanovení účinnosti ze ztrát, tzv. metoda nepřímá (ztrátová). Metoda spočívá ve stanovení tepelných ztrát kotle $\sum_1^i Z_i$ a následné odečtení ztrát od maximální teoretické účinnosti spalovacího zařízení, která je 100 [%] (viz rovnice č. 6.1).

$$\eta_k = 1 - \sum_1^i Z_i \quad (\text{rovnice 6.1})$$

6.1 Tepelné ztráty kotle

Při stanovení tepelných ztrát kotle jsem počítal s redukovanou výhřevností paliva, kterou jsem stanovil v kap. 3.1.1, a předpokládám, že uhlí na vstupu bude mít stejnou teplotu jako je teplota vztažná $t_0 = 20$ [°C]. Nasávaný vzduch bude přehříván v PVS.

Do tepelných ztrát kotle jsem zahrnul tyto ztráty:

- ztráta mechanickým nedopalem Z_C ,
- ztráta chemickým nedopalem Z_{CO} ,
- ztráta sáláním a vedením tepla do okolí Z_{sv} ,
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f ,
- ztráta citelným teplem spalin Z_k .

6.1.1 Ztráta mechanickým nedopalem

Ztráta mechanickým nedopalem představuje ztrátu nespálenou hořlavinou v tuhých zbytcích. Tyto výpočty jsem zpracoval na základě literatury [1]. Hodnoty podílu spalitelných látek v tuhých zbytcích jsem čerpal z kapitoly 5 a tab. 5-1 literatury [1]. Ztráta nedopalem v roštovém propadu nebude uvažována, jelikož kotel využívá moderní bezpropadový typ pásového roštu.

$$Z_C = Z_{cs} + Z_{cú} [-] \quad (\text{rovnice 6.2})$$

Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce

$$Z_{cs} = \frac{C_s}{1 - C_s} \cdot x_s \cdot \frac{A^r}{Q_{i,red}^r} \cdot Q_{Ci} \quad (\text{rovnice 6.3})$$

$$Z_{cs} = \frac{0,06}{1 - 0,06} \cdot 0,70 \cdot \frac{0,18}{23256} \cdot 32700$$

$$Z_{cs} = 0,0113 [-]$$

Ztráta mechanickým nedopalem v úletu

$$Z_{cú} = \frac{C_p}{1 - C_p} \cdot x_p \cdot \frac{A^r}{Q_{i,red}^r} \cdot Q_{Ci} \quad (\text{rovnice 6.4})$$

$$Z_{cú} = \frac{0,1992}{1 - 0,1992} \cdot 0,3 \cdot \frac{0,18}{23256} \cdot 32700$$

$$Z_{cú} = 0,0215 [-]$$

Celková ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_C = Z_{cs} + Z_{cú} [-] \quad (\text{rovnice 6.5})$$

$$Z_C = 0,0113 + 0,0215$$

$$Z_C = 0,0328 [-]$$

6.1.2 Ztráta chemickým nedopalem

Ztráta chemickým nedopalem vyjadřuje teplo unikající důsledkem obsahu nespálených plynů ve spalinách. Emisní limit mgCO [mg/Nm³] a obsah kyslíku O_{2,ref} [%] pro referenční stav spalin jsem určil z tab. 5-3 literatury [1].

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot \text{mgCO} \cdot V_{SPS,skut}}{(21 - O_{2,ref}) \cdot Q_{i,red}^r} \quad (\text{rovnice 6.6})$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 250 \cdot 7,867}{(21 - 0,06) \cdot 23256}$$

$$Z_{CO} = 0,000898 \quad [-]$$

6.1.3 Ztráta sáláním a vedením do okolí

Tuto ztrátu volím podle druhu použitého paliva a výrobního tepla kotle, odečtením z obr. 5-1 literatury [1].

$$Z_{sv} = 0,004 \quad [-]$$

6.1.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = \sum Z_{fi} = Z_s + Z_p$$

Ztráta fyzickým teplem strusky

Střední měrná tepelná kapacita strusky c_{p,str}, při teplotě t_{str}= 600 [°C], byla odečtena z tab. 4-9 literatury [1].

$$Z_s = \frac{X_s}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_{i,red}^r} \cdot c_s \cdot t_s \quad [-] \quad (\text{rovnice 6.7})$$

$$Z_s = \frac{0,70}{1 - 0,04} \cdot \frac{0,18}{23256} \cdot 0,9301 \cdot 600$$

$$Z_s = 0,00322 \quad [-]$$

Ztráta fyzickým teplem popílku v úletu

Střední měrná tepelná kapacita popílku $c_{p, \text{pop.}}$, při teplotě $t_p = 140$ [°C], byla odečtena z tab. 4-9 literatury [1] a dále interpolována.

$$Z_p = \frac{X_p}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_{i, \text{red}}^r} \cdot c_p \cdot t_p \quad [-] \quad (\text{rovnice 6.8})$$

$$c_p = \frac{0,8498 - 0,8036}{200 - 100} \cdot (140 - 100) + 0,8036 = 0,8221 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$Z_p = \frac{0,30}{1 - 0,336} \cdot \frac{0,18}{23256} \cdot 0,8221 \cdot 140$$

$$Z_p = 0,000334 \quad [-]$$

$$Z_f = Z_s + Z_p$$

$$Z_f = 0,00355 \quad [-]$$

6.1.5 Ztráta citelným teplem spalin (komínová)

Tato ztráta představuje teplo, které odchází z kotle v kouřových plynech, a nejvíce ovlivňuje celkovou účinnost kotle. Velikost této ztráty závisí na teplotě spalin a přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem. Rovnice 6.9 byla převzata z literatury [1]. Entalpie spalin pro teplotu $t_s = 140$ [°C]

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_s^{t_k, n_k} - n_k \cdot I_{VZ}}{Q_{i, \text{red}}^r} \quad (\text{rovnice 6.9})$$

$$Z_k = (1 - 0,0328) \cdot \frac{2033,813 - 1,4 \cdot 159,876}{23256}$$

$$Z_k = 0,0768 \quad [-]$$

6.2 Stanovení účinnosti kotle

$$\eta_k = 100 - \sum Z_i = 100 - (Z_c + Z_{CO} + Z_{sv} + Z_f + Z_k) \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{rovnice 6.10})$$

$$\eta_k = 100 - (0,03282 + 0,000898 + 0,004 + 0,00355 + 0,07685) \cdot 100$$

$$\eta_k = 88,19 \quad [\%]$$

6.2.1 Množství paliva

Skutečné množství paliva přivedeného do kotle.

Podle množství paliva přivedeného do kotle se dimenzují dopravníky na uhlí, vynašeče strusky a odlučovače popílku.

$$M_{\text{pal}} = \frac{Q_v}{Q_{i,red}^r \cdot \eta_k} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{rovnice 6.11})$$

$$M_{\text{pal}} = \frac{120000}{23256 \cdot 0,8819}$$

$$M_{\text{pal}} = 5,85 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Výpočtové množství spáleného paliva

Pro určení množství spalin a spalovacího vzduchu se používá výpočtové množství spáleného paliva.

$$M_v = M_{\text{pal}} \cdot (1 - Z_c) \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{rovnice 6.12})$$

$$M_v = 5,85 \cdot (1 - 0,0328)$$

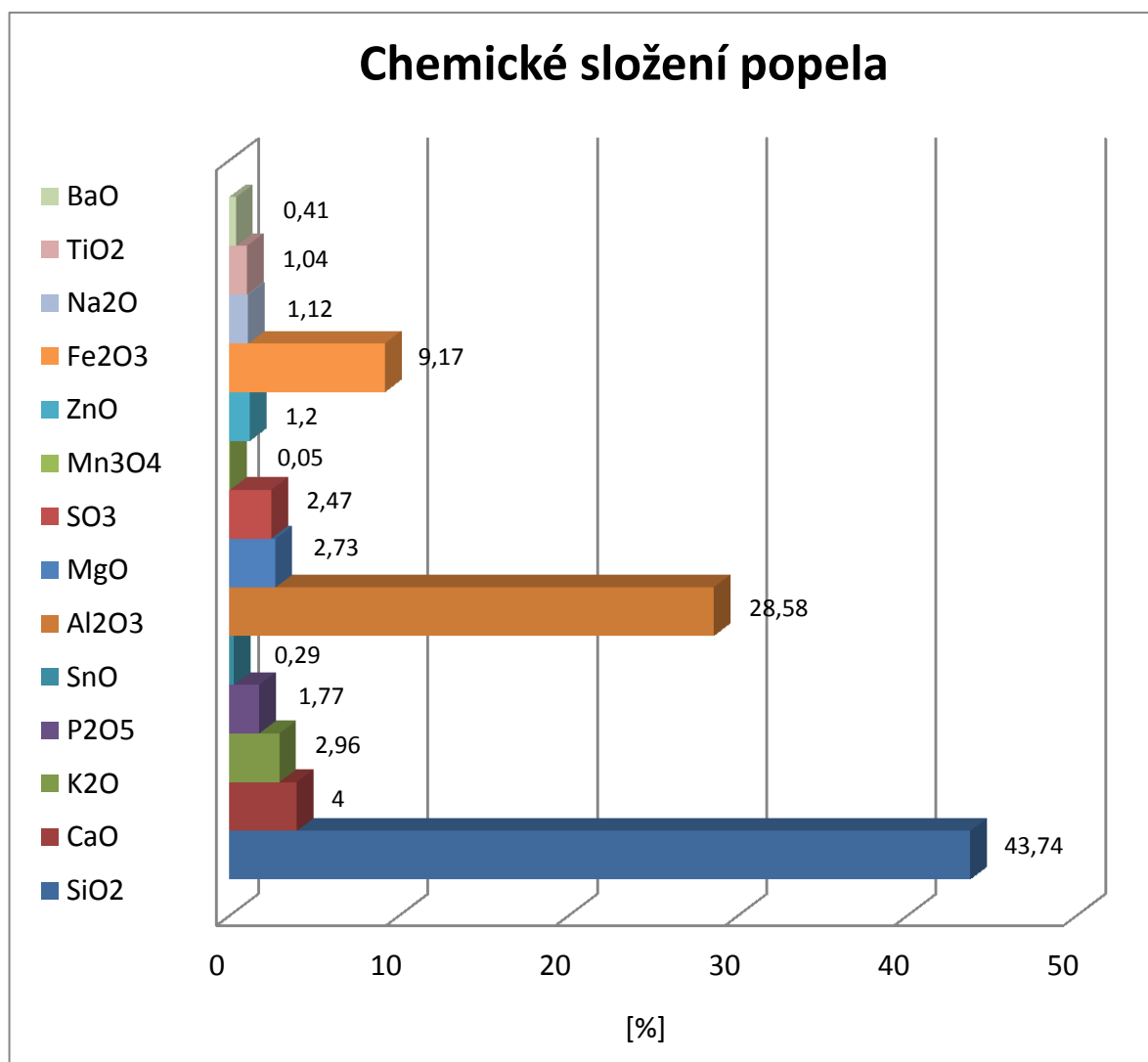
$$M_v = 5,659 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

7 Struskování

Tato kapitola byla zpracována na základě literatury [5]. Struskové nánosy se tvoří při spalování paliva obsahující popelovinu (popel). Při spalování tohoto paliva dochází vždy ke tvorbě nánosů. Tyto nánosy můžeme dělit do dvou skupin podle způsobu vzniku:

- *popílkové* – na konvekčních plochách se za nižší teploty tvoří nánosy popílkových částic,
- *struskové* – na teplosměnných plochách a stěnách ohniště se tvoří pevně lpící usazeniny, vzniklé částečným roztavením, nebo změknutím popelovin při vysokých teplotách.

Chemické složení popela viz graf 7-1.



Graf 7-1 Chemické složení popela

7.1 Výpočet náchylnosti paliva k tvorbě nánosů

Na termoplastické vlastnosti má vliv převážně poměr kyselých (A) a zásaditých (B) oxidů. Kritériem posuzujícím náchylnosti paliva k tvoření popelových nánosů jsou rovnice 7.3 pro tvorbu struskových nánosů a rovnice 7.4 pro tvorbu popílkových nánosů.

Kyselé oxidy:

$$A = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 \quad [\%] \quad (\text{rovnice 7.1})$$

$$A = 43,74 + 28,58 + 1,04$$

$$A = 73,36 \quad [\%]$$

Zásadité oxidy:

$$B = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \quad [\%] \quad (\text{rovnice 7.2})$$

$$B = 9,17 + 4 + 2,73 + 1,12 + 2,96$$

$$B = 19,98 \quad [\%]$$

Tvorba struskových nánosů:

$$R_s = \frac{B}{A} \cdot S^d \quad [-] \quad (\text{rovnice 7.3})$$

$$R_s = \frac{19,98}{73,36} \cdot 0,549$$

$$R_s = 0,15 \quad [-]$$

Tvorba popílkových nánosů:

$$R_p = \frac{B}{A} \cdot \text{Na}_2\text{O} \quad [-] \quad (\text{rovnice 7.4})$$

$$R_p = \frac{19,98}{73,36} \cdot 0,549$$

$$R_p = 0,305 \quad [-]$$

Posouzení náchylnosti paliva k tvorbě nánosů jsem provedl porovnáním výsledků s tabulkovými hodnotami (tab. 7-1).

Náchylnost popela k tvorbě nánosů	Struskových (v ohništi) R_s	Popílkových (konvekční tah) R_p
slabá	< 0,6	< 0,2
střední	0,6 až 2,0	0,2 až 0,5
velká	2,0 až 2,6	0,5 až 1,0
velmi velká	> 2,6	> 1,0

Tab. 7-1 Náchylnost paliva k tvorbě nánosů, z literatury [5]

Na základě vypočtených hodnot a následném porovnání s tabulkovými hodnotami v tab. 7-1 jsem určil, že náchylnost paliva pro tvoření struskových nánosů R_s je slabá, pro tvoření popílkových nánosů R_p odpovídá hodnotám střední náchylnosti pro tvoření.

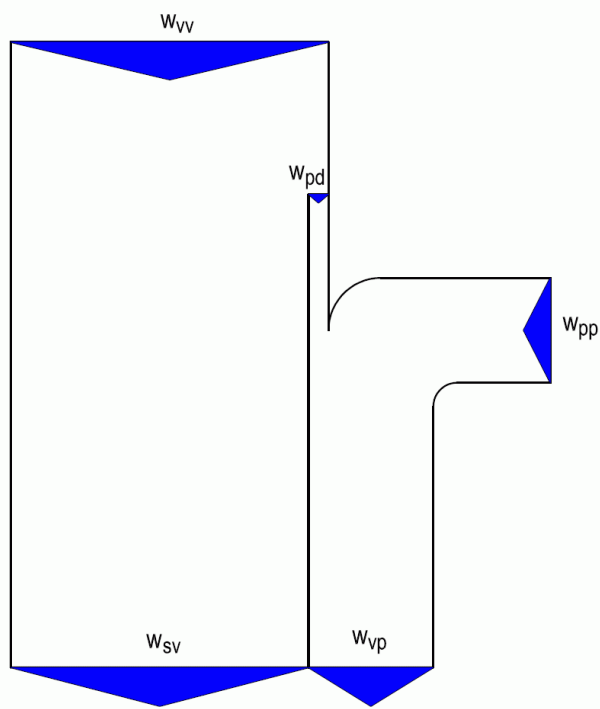
Proto do spalovací komory neuvažuji ostřikovače stěn, ale pro čištění svazkových ploch od popílkových nánosů kotel vybavím. Pro čištění ploch od popílkových nánosů použiji některý ze systémů čištění vzduchem, parní ofukovače nepoužiji.

8 Stanovení parametrů parovzduchové směsi

8.1 Parovzduchová směs

Tato kapitola byla zpracována na základě literatury [4]. Parovzduchovou směs, zkráceně PVS, lze definovat jako směs stlačeného reálného vzduchu pomocí kompresoru smíseného s procesní párou. Procesní páru definujeme jako páru, která vznikla při nepřímém chlazení membránových stěn spalovací komory, nebo také při přímém chlazení vzduchu, vstřikem vody do vzduchu, nebo přímo do PVS. V následujících výpočtech se budu řídit množstvím procesní páry w_{pp} vzniklé chlazením membránových stěn spalovací komory, které určuje koncentraci procesní páry v PVS, ale výpočty termodynamických a transportních vlastností PVS budou provedeny se skutečnou koncentrací vodní páry w_{vp} . Vodní pára v tomto případě slouží jako souhrnné označení procesního množství páry a vlhkosti v nasávaném vzduchu.

V PVS může pára existovat i v přehřátém stavu nebo ve stavu nasyceném, pokud bude dosaženo rosného bodu PVS, který je definován parciálním tlakem. V případě nasyceného stavu bude množství vodní páry obsažené v PVS rovno právě parciálnímu tlaku vodní páry. Pro zpřehlednění je na obr. 8.1 znázorněno pomocí Sankeyova diagramu množství vodní páry zvětšené o vlhkost obsaženou v nasávaném vzduchu.



Obr. 8.1 Schéma PVS, z literatury [4].

8.2 Výpočet parametrů PVS

8.2.1 Hmotnostní koncentrace složek PVS

Výpočet hmotnostní koncentrace složek PVS je složen z koncentrace vodní páry w_{vp} a koncentrací suchého vzduchu w_{sv} . Reálný vlhký vzduch je definován svou teplotou tlakem a relativní vlhkostí. Pro určení skutečného množství vodní páry w_{vp} , je nutné vypočíst měrnou vlhkost vzduchu d , která se vypočte dle rovnice 8.1.

Měrné plynové konstanty a parciální tlak vodní páry jsem vypočetl pomocí programu EES.

$$r_{sv} = (8314,3 / (\text{MolarMass}(\text{Air_ha})))$$

$$r_{vp} = (8314,3 / (\text{MolarMass}(\text{Steam_IAPWS})))$$

$$p_{pp} = \text{Pressure}(\text{Steam_IAPWS}; T=20; v=1)$$

Měrná vlhkost nasávaného vzduchu

$$d = \frac{r_{sv}}{r_{vp}} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{pp}}{p_c - \varphi \cdot p_{pp}} \quad [\text{kg/kg}] \quad (\text{rovnice 8.1})$$

$$d = \frac{287,1}{461,5} \cdot \frac{0,6 \cdot 0,02339}{1,01325 - 0,6 \cdot 0,02339}$$

$$d = 0,008738 \quad [\text{kg/kg}]$$

Koncentrace páry ve vlhkém vzduchu

$$w_{pd} = \frac{d}{1 + d} \quad [\text{kg/kg}] \quad (\text{rovnice 8.2})$$

$$w_{pd} = \frac{0,008738}{1 + 0,008738}$$

$$w_{pd} = 0,008663 \quad [\text{kg/kg}]$$

Koncentrace vodní páry v PVS

$$w_{vp} = (1 - w_{pp}) \cdot w_{pd} + w_{pp} \text{ [kg/kg]} \quad (\text{rovnice 8.3})$$

$$w_{vp} = (1 + 0,4316) \cdot 0,008663 + 0,4316$$

$$w_{vp} = 0,2502 \text{ [kg/kg]}$$

Koncentrace suchého vzduchu v PVS

$$w_{sv} = (1 - w_{vp}) \text{ [kg/kg]} \quad (\text{rovnice 8.4})$$

$$w_{sv} = (1 - 0,2502)$$

$$w_{sv} = 0,7498 \text{ [kg/kg]}$$

8.2.2 Stanovení parciálních tlaků vodní páry a suchého vzduchu

Stanovení parciálního tlaku vodní páry

$$p_{vp} = p_c \cdot \left[1 - \frac{w_{sv} \cdot r_{sv}}{w_{sv} \cdot r_{sv} + w_{vp} \cdot r_{vp}} \right] \text{ [bar]} \quad (\text{rovnice 8.5})$$

$$p_{vp} = 11,08 \cdot \left[1 - \frac{0,7498 \cdot 287,1}{0,7498 \cdot 287,1 + 0,2501 \cdot 461,5} \right]$$

$$p_{vp} = 3,869 \text{ [bar]}$$

Stanovení parciálního tlaku suchého vzduchu

$$p_{sv} = p_c - p_{vp} \text{ [bar]} \quad (\text{rovnice 8.6})$$

$$p_{sv} = 11,08 - 3,869$$

$$p_{sv} = 7,211 \text{ [bar]}$$

8.2.3 Stanovení entalpie PVS

Parametry PVS z hlediska termodynamických vlastností lze určovat pomocí vlastností standardního suchého vzduchu a vodní páry, jelikož jsou tyto vlastnosti tabelovány. Celková entalpie PVS je dána především teplotou a tlakem směsi, ale také hmotnostním podílem vodní páry v parovzduchové směsi. Celková entalpie se tedy stanoví součtem entalpie suchého vzduchu a entalpie vodní páry, které jsou vynásobeny koncentrací daného média v PVS.

Výpočet střední měrné tepelné kapacity a entalpie vodní páry i_{vp} jsem vypočetl pomocí programu EES, kdy hodnota $t_o = 0$ [°C], $t_{sm} = 850$ [°C], $p_{pvs} = 11,08$ [bar] a $p_b = 1,0325$ [bar]. Výpočet proběhl pomocí procedury:

$$i_1 = \text{Enthalpy}(\text{Air_ha}; T = t_o; P = p_b)$$

$$i_2 = \text{Enthalpy}(\text{Air_ha}; T = t_{sm}; P = p_{\text{suchy_vzduch}})$$

$$Q = (i_1 - i_2)$$

$$cp_{str} = Q / (t_{sm} - t_o)$$

$$i_{vp} = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T = t_{sm}; P = p_{\text{vod_para}}) - \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T = 0; P = p_b)$$

Stanovení entalpie suchého vzduchu

$$i_{sv} = cp_{str} \cdot t_{sm} \text{ [kJ/kg]} \quad (\text{rovnice 8.5})$$

$$i_{sv} = 1,078 \cdot 850$$

$$i_{sv} = 916 \text{ [kJ/kg]}$$

Stanovení entalpie PVS

$$i_{sm} = w_{sv} \cdot i_{sv} + w_{vp} \cdot i_{vp} \text{ [kJ/kg}_{PVS}] \quad (\text{rovnice 8.6})$$

$$i_{sm} = 0,751 \cdot 916 + 0,249 \cdot 4277$$

$$i_{sm} = 1753 \text{ [kJ/kg}_{PVS}]$$

8.2.4 Stanovení Hustoty PVS

Pro zjednodušení lze hustotu PVS vyjádřit podle rovnice 8.7 jako součet hustoty vodní páry a hustoty suchého vzduchu. Při použití výpočtového programu EES lze hustotu PVS vypočítat jako součet hustoty suchého vzduchu a vodní páry při zadaném tlaku a teplotě PVS.

Výpočet měrné plynové konstanty suchého vzduchu a vodní páry jsem vypočetl v programu EES pomocí procedury:

$$r_{sv} = (8314,3 / (\text{MolarMass}(\text{Air_ha}))),$$

$$r_{vp} = (8314,3 / (\text{MolarMass}(\text{Steam_IAPWS}))).$$

Stanovení hustoty PVS

$$\rho_{sm} = \frac{p_{sv}}{r_{sv} \cdot T_{sm}} + \frac{p_{vp}}{r_{vp} \cdot T_{sm}} \quad [kg/m^3] \quad (\text{rovnice 8.7})$$

$$\rho_{sm} = \frac{7,211}{287,1 \cdot 850} + \frac{3,869}{0,2502 \cdot 850}$$

$$\rho_{sm} = 2,718 \quad [kg/m^3]$$

Stanovení hustoty PVS při normálních podmínkách

$$\rho_{sm,N} = \rho_{sm} \cdot \frac{p_N}{p_{sm}} \cdot \frac{T_{sm}}{T_N} \quad [kg/m^3] \quad (\text{rovnice 8.8})$$

$$\rho_{sm,N} = 2,718 \cdot \frac{1,01325}{12} \cdot \frac{850}{273,15}$$

$$\rho_{sm,N} = 0,714 \quad [kg/m^3]$$

8.2.5 Stanovení transportních vlastností PVS

Pro výpočet transportních vlastností PVS jsem použil tyto základní součinitele:

- a) součinitel tepelné vodivosti p_{vs} ,
- b) součinitel dynamické viskozity p_{vs} .

Výpočet tepelné vodivosti PVS

Pro výpočet tepelné vodivosti parovzduchové směsi jsem použil program EES, především pak pro výpočet součinitele tepelné vodivosti λ [W/m·k], molárního podílu y [-] a molární hmotnosti látky M [kg/kmol], pomocí procedury:

$\lambda_{sv} = \text{Conductivity}(\text{Air_ha}; T=t_{sm}; P=p_{sm}),$

$\lambda_{vp} = \text{Conductivity}(\text{Steam_IAPWS}; T=t_{sm}; P=p_{sm}),$

$M_{sv} = \text{MolarMass}(\text{Air_ha}),$

$M_{vp} = \text{MolarMass}(\text{Steam_IAPWS}),$

$y_{sv} = M_{sv} / (M_{sv} + M_{vp}),$

$y_{vp} = M_{vp} / (M_{sv} + M_{vp}).$

$$\lambda_{sm} = \frac{y_{sv} \cdot \lambda_{sv} \cdot M_{sv}^{1/3} + y_{vp} \cdot \lambda_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}}{y_{sv} \cdot M_{sv}^{1/3} + y_{vp} \cdot M_{vp}^{1/3}} \quad [W/m \cdot k] \quad (\text{rovnice 8.9})$$

$$\lambda_{sm} = \frac{0,6165 \cdot 0,0739 \cdot 28,96^{1/3} + 0,3835 \cdot 0,1144 \cdot 18,02^{1/3}}{0,6165 \cdot 28,96^{1/3} + 0,3835 \cdot 18,02^{1/3}}$$

$$\lambda_{sm} = 88,39 \cdot 10^{-3} [W/m \cdot k]$$

Výpočet viskozity PVS

Dynamická viskozita PVS:

$$\phi_{pv} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{vp}}{\eta_{sv}} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{sv}}{M_{vp}} \right)^{1/2} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{M_{vp}}{M_{sv}} \right)^{1/2}} \quad [1] \quad (\text{rovnice 8.10})$$

$$\phi_{pv} = \frac{\left[1 + \left(\frac{42,29}{46,73} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{28,96}{18,02} \right)^{1/2} \right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{18,02}{28,96} \right)^{1/2}}$$

$$\phi_{pv} = 1,350 [1]$$

$$\phi_{vp} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{sv}}{\eta_{vp}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{M_{vp}}{M_{sp}}\right)^{1/2}\right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{M_{sv}}{M_{vp}}\right)^{1/2}} \quad [1] \quad (\text{rovnice 8.11})$$

$$\phi_{vp} = \frac{\left[1 + \left(\frac{46,73}{42,29}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{18,02}{28,96}\right)^{1/2}\right]^2}{\sqrt{8} \cdot \left(1 + \frac{28,96}{18,02}\right)^{1/2}}$$

$$\phi_{vp} = 0,733 \quad [1]$$

Výpočet dynamické viskozity PVS

$$\eta_{sm} = \frac{\eta_{vp}}{1 + \phi_{vp} \cdot \frac{y_{sv}}{y_{vp}}} + \frac{\eta_{sv}}{1 + \phi_{vp} \cdot \frac{y_{vp}}{y_{sv}}} \quad [Pa/s] \quad (\text{rovnice 8.12})$$

$$\eta_{sm} = \frac{42,29 \cdot 10^{-6}}{1 + 1,350 \cdot \frac{0,6165}{0,3835}} + \frac{46,73 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,733 \cdot \frac{0,3835}{0,6165}}$$

$$\eta_{sm} = 45,43 \cdot 10^{-6} \quad [Pa/s]$$

Výpočet kinematické viskozity PVS

$$\nu_{sm} = \frac{\eta_{sm}}{\rho_{sm}} \quad [m^2/s] \quad (\text{rovnice 8.13})$$

$$\nu_{sm} = \frac{45,43 \cdot 10^{-6}}{2,718}$$

$$\nu_{sm} = 1,671 \cdot 10^{-5} \quad [m^2/s]$$

Objemový průtok PVS za normálních podmínek

Hmotnostní tok PVS je ze zadání $\dot{m}_{PVS} = 56,65 \text{ [kg/s]}$, hustota PVS při normálních podmínkách $\rho_{sm,N} = 0,714 \text{ [kg/m}_N^{-3}\text{]}$, byla vypočtena v kap. 8.2.4

$$V_{PVS,N}^{obj} = \frac{\dot{m}_{PVS}}{\rho_{sm,N}} \quad [m_N^3/kg] \quad (\text{rovnice 8.14})$$

$$V_{PVS,N}^{obj} = \frac{56,65}{0,714}$$

$$V_{PVS,N}^{obj} = 79,341 \text{ [m}_N^3\text{/kg]}$$

9 Stanovení účinnosti FES

V této kapitole se zabývám stanovením celkové účinnosti flexibilního energetického systému pro zadaný provozní stav. Výpočet jsem provedl na modelu FES, naprogramovaném pomocí EES softwaru a dílčích procedur, jako jsou určení entalpie spalin a určení entalpie PVS, které jsem uvedl v příloze č. 1. Pro zadaný provozní stav zatím neuvažuji s použitím PVS jako spalovacího vzduchu. Bilanční výpočet celého systému jsem rozdělil na několik dílčích oddílů pro lepší orientaci. Celkovou sestavu systému FES jsem navrhl na výkresu v příloze č. 2. Tento oběh lze rozdělit na dvě části, první část je Braytonův oběh a druhou částí Rankinův oběh.

Vstupní data, která jsem musel v rámci simulace provozního stavu dodržet:

Parametry vzduchu na vstupu do kompresoru a sání spalovacího vzduchu

$$t_o = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p_o = 1,0325 \text{ [bar]}$$

$$\phi = 60 \text{ [%]}$$

Teplota spalin za OSV

$$t_s = 140 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Výrobní teplo kotle

$$Q_v = 120 \text{ [MW]}$$

Množství spalovacího vzduchu na vstupu do RGV

$$\dot{m}_{SV} = 54,59 \text{ [kg/s]}$$

Parametry napájecí vody na vstupu do ROVI

$$\dot{m}_{NV} = 22,91 \text{ [kg/s]}$$

$$p_{NV} = 35,51 \text{ [bar]}$$

Množství vzduchu na vstupu do kompresoru

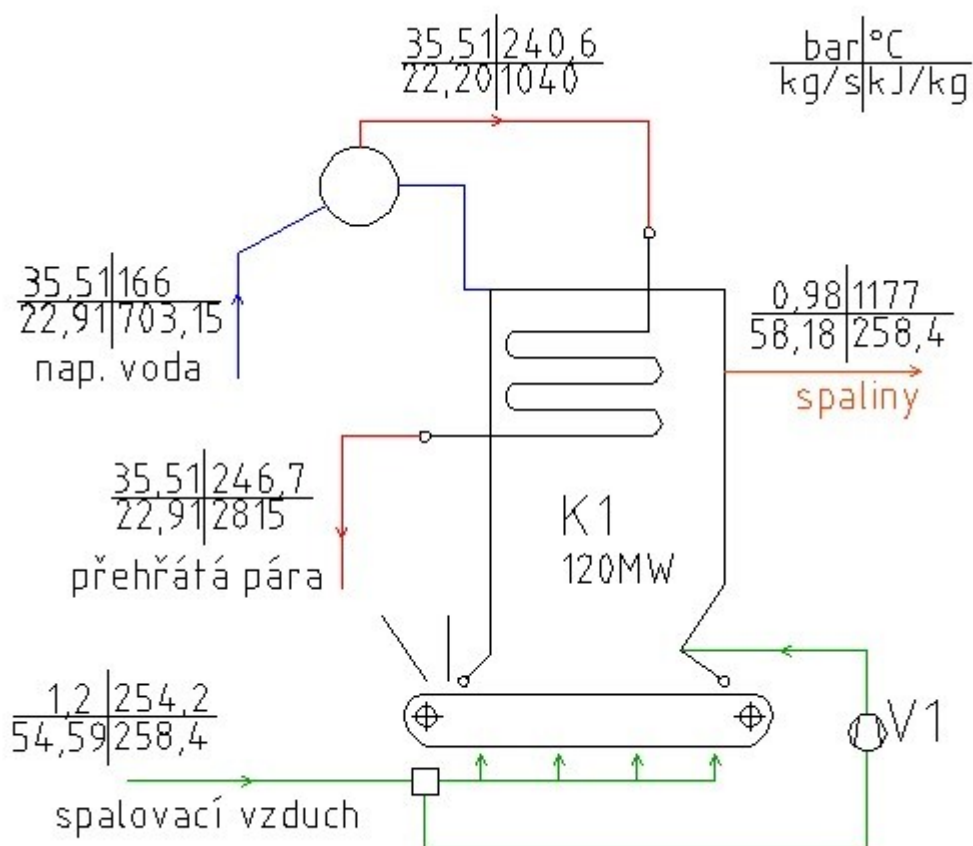
$$\dot{m}_{VZ,K} = 33,74 \text{ [kg/s]}$$

Tlak vzduchu na výstupu s kompresoru

$$p_{VZ,výstup} = 15 \text{ [bar]}$$

9.1 Bilance roštového kotle o výkonu 120 MW

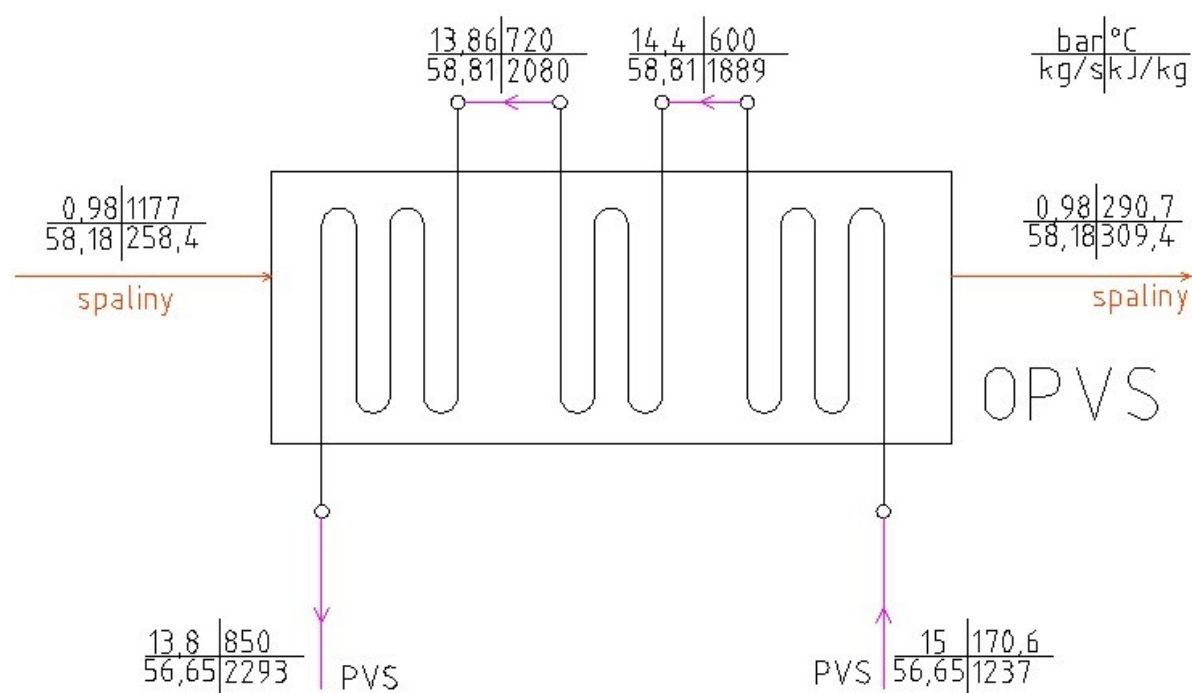
V tomto provozním stavu FESu je jako zdroj procesní páry a spalin roštový kotel na černé uhlí s přirozenou cirkulací zobrazený na obr. 9.1, jehož účinnost spalování $\eta_k = 88,19 \%$, jež byla vypočtena v kapitole 6. Spalovací vzduch je nasáván z okolí a před vstupem do kotle je přes regenerační výměník vody *RGV* a dále pak přes ohřívák spalovacího vzduchu *OSV* viz příloha č. 2, ohříván na požadovanou teplotu. Napájecí voda je do kotle přivedena z napájecí nádrže přes mezichladič kompresorových stupňů. Po vypaření ve výparníku a přehřátí ve výstupním přehříváku je procesní pára vedena na redukční parní turbínu. Spaliny vzniklé ve spalovací komoře jsou vedeny spalinovým kanálem do *OPVS* a dále také do *OSV*. Po vychlazení spalin na teplotu $t_s=140[^\circ\text{C}]$, jsou odvedeny spalinovým ventilátorem do komína.



Obr. 9.1 Roštový kotel 120 [MW]

9.2 Bilance Ohříváku parovzduchové směsi

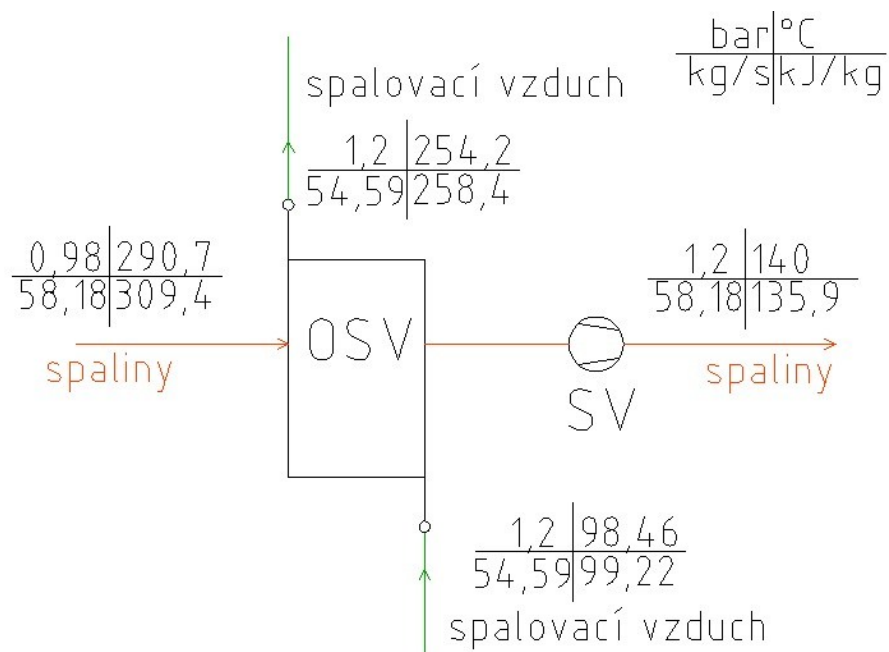
Ohřívák parovzduchové směsi OPVS, zobrazený na obr. 9.2, je složen z více na sebe navazujících sekcí. Pro zjednodušení bilančního výpočtu jsem výpočet OPVS vyhodnotil jako celek a nerozděloval jsem ho na dané sekce. Neuvažuji zde také s umístěním přehříváku pro parní turbínu PT2. Ve výpočtu byla uvažována ztráta sdílením tepla do okolí ve výši 5%. Na vstupu do OPVS jsou spaliny o teplotě 1177 [°C], na výstupu jsou spaliny o teplotě 290,7 [°C] a dále jsou přivedeny do trubkového ohříváku vzduchu.



Obr. 9.2 Bilance OPVS

9.3 Bilance ohříváku spalovacího vzduchu

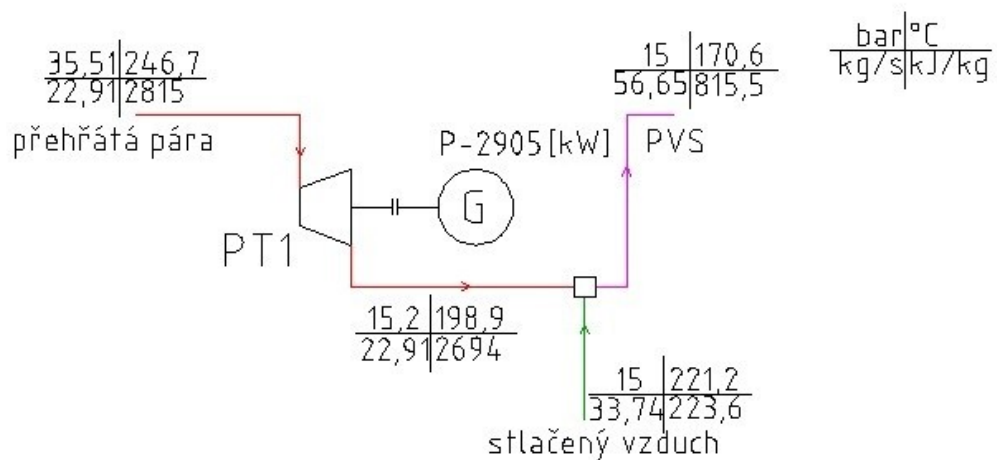
Bilance ohříváku spalovacího vzduchu je zobrazena na obr. 9.3. V tomto případě se jedná o trubkový ohřívák spalovacího vzduchu, který je řazen jako poslední teplosměnná plocha ve spalínovém kanálu. Za OSV je požadovaná teplota spalin nad rosným bodem, což znamená pro zadaný provozní stav $t_s=140$ [°C], na výstupu jsou spaliny dopraveny spalínovým ventilátorem do komína. Ve výpočtu byla uvažována ztráta sdílením tepla do okolí ve výši 5%.



Obr. 9.3 Bilance ohříváku spalovacího vzduchu

9.4 Bilance redukční parní turbíny PT1

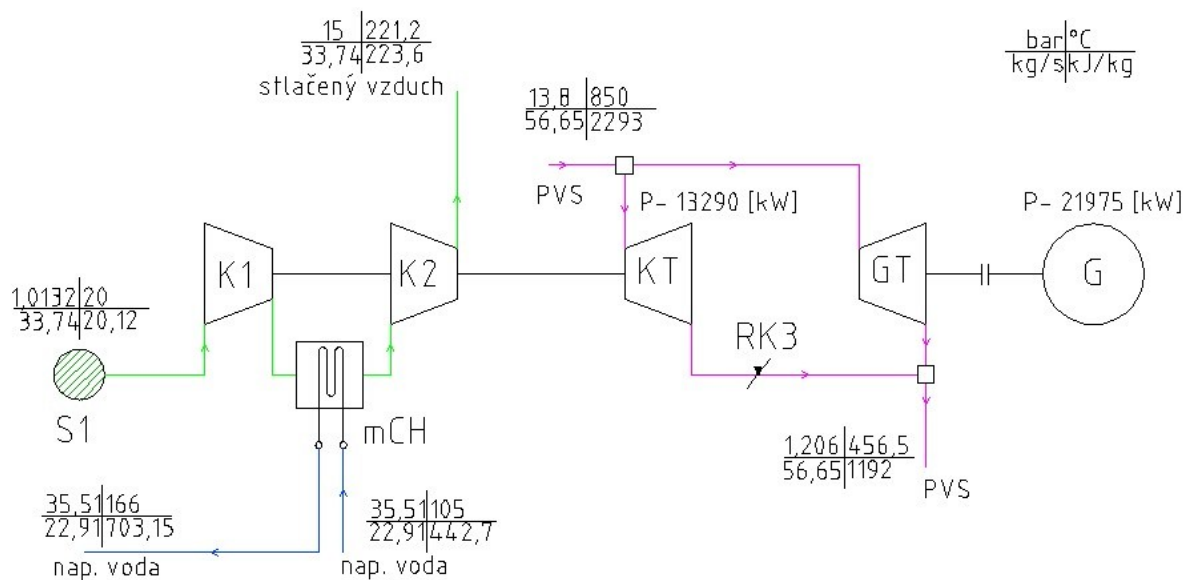
Pro zvýšení účinnosti FES je za kotlem řazena redukční parní turbína viz obr. 9.4. Primárním úkolem této turbíny je zajištění regulace tlaku páry před vstupem do směšovače PVS, a také snížení teploty na výstupu pro carnotizaci celého tepelného oběhu. Pro výpočet je uvažovaná účinnost parní turbíny $\eta = 80$ [%]. Na výstupu z turbíny je mokrá pára s nasycením $x = 0,95$ [–]. Jedná se o malou turbínu s výkonem $P=2905$ [kW], která bude navržena pro klouzavé parametry páry.



Obr. 9.4 Redukční parní turbína PT1

9.5 Balance kompresoru a plynové turbíny

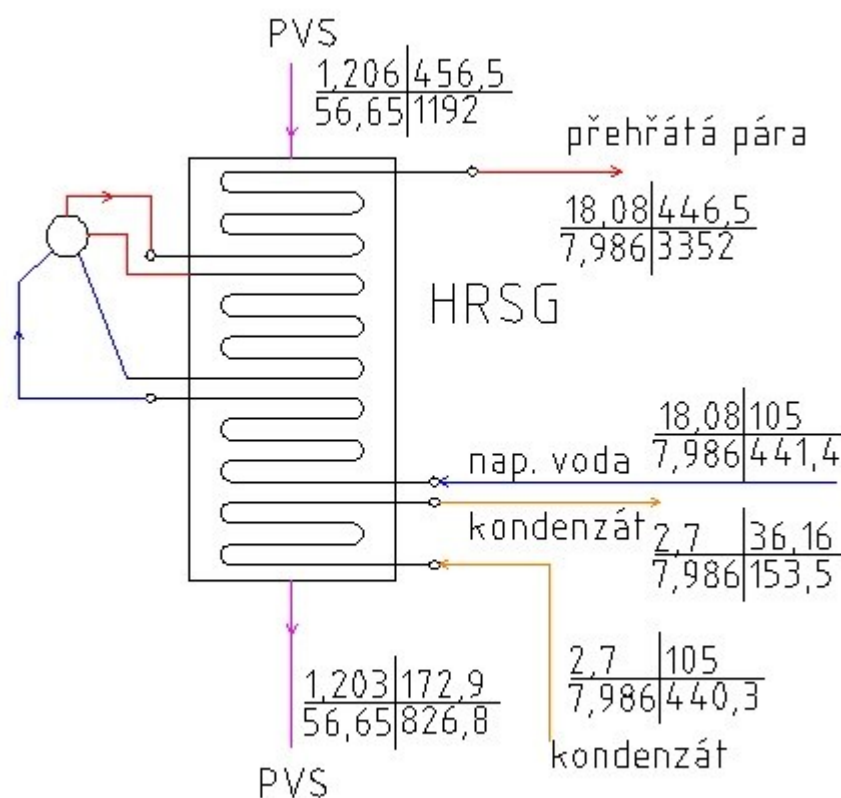
Jednou z nejdůležitějších částí FES, především pak Braytonova oběhu, jsou kompresor a plynová turbína, viz obr. 9.5. Stlačení nasávaného vzduchu zajišťuje dvoustupňový turbokompresor, mezi jednotlivými stupni je mezichladič stlačeného vzduchu, který napomáhá k lepší účinnosti komprese vzduchu. Jako chladicí médium je použita napájecí voda do kotle. Pohon kompresoru zajišťuje plynová turbína na PVS, která slouží jenom k pohonu turbokompresoru, tudíž není připojena ke generátoru. V zapojení je zařazena samostatná plynová turbína na PVS, která je propojena s el. generátorem, výkon této turbíny vzhledem k zadaným provozním parametrům je $P = 21975$ [kW]. Uvažovaná účinnost kompresoru a turbíny je $\eta = 80$ [%].



Obr. 9.5 Balance kompresoru s mezichladičem a plynové turbíny

9.6 Bilance HRSG kotle na odpadní teplo PVS

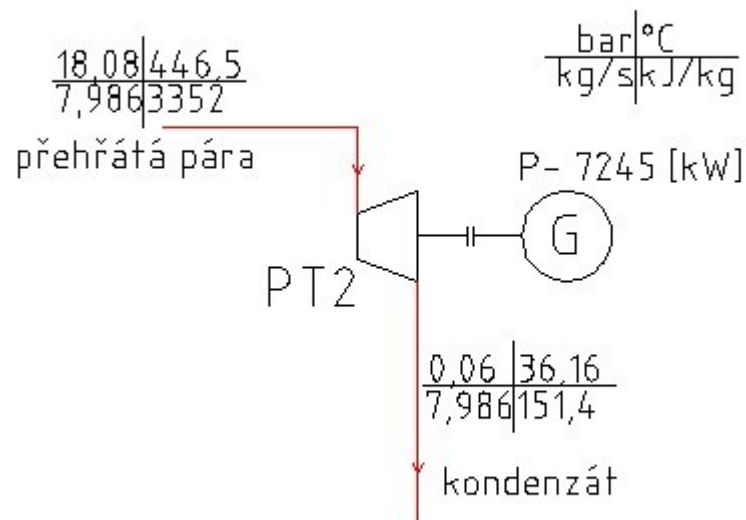
Zařazení kotle HRSG, viz obr. 9.6, za plynovou turbínu na PVS zajišťuje co nejefektivnější využití tepla již vyexpandované PVS. Jedná se o samostatný Rankinův cyklus s kondenzační parní turbínou. Rankinův oběh je oddělen od Braytonova cyklu najížděcí klapou *NK*, viz příloha č. 2, která při najíždění dočasně vyřadí kotel *HRSG* a vzniklou PVS odvádí do okolí odfukem *OI*. Kotel na odpadní teplo slouží k výrobě přehřáté páry pro parní turbínu *PT2*, viz příloha č. 2, a také k ohřátí kondenzátu který je odváděn kondenzačním čerpadlem z kondenzátoru turbíny *PT2*. Ve výpočtu *HRSG* byla uvažována ztráta sdílením tepla do okolí ve výši 5%.



Obr. 9.6 Bilance HRSG kotle na odpadní teplo PVS

9.7 Bilance parní turbíny PT2

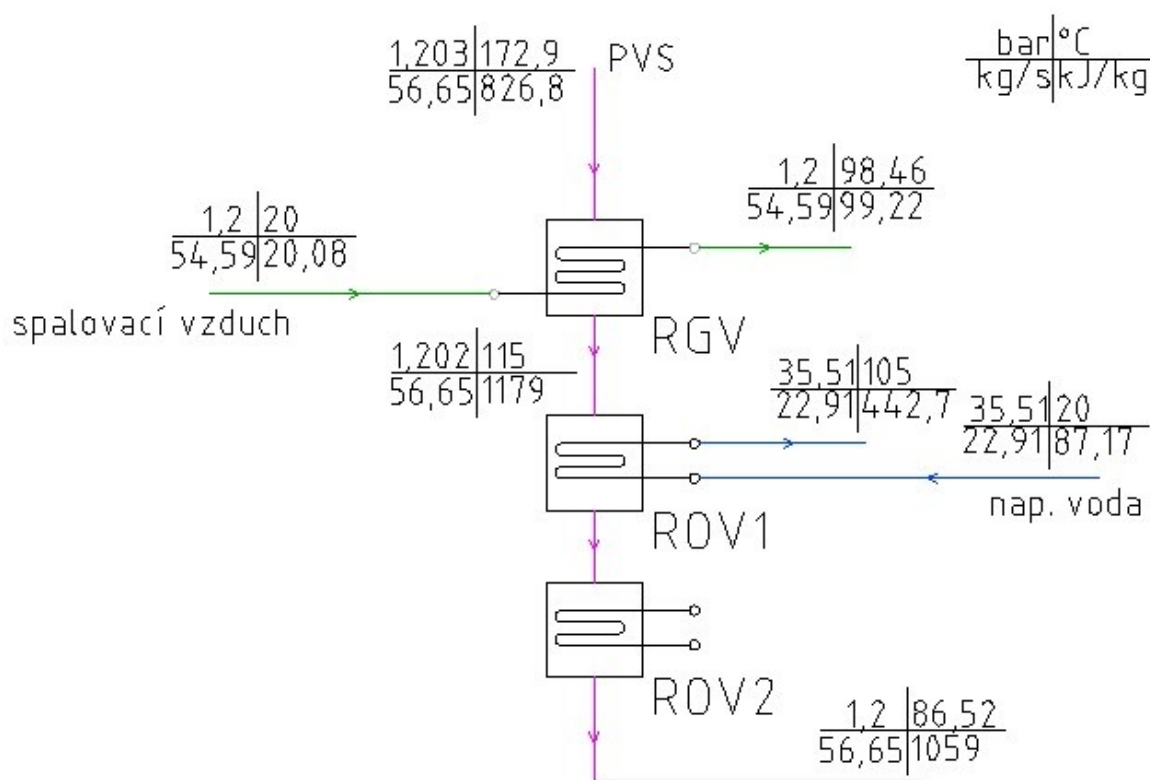
Parní turbína PT2, jež je zobrazena na obr. 9.7, která je zařazena za kotlem na odpadní teplo *HRSG*, viz příloha č. 2. Turbína slouží k využití generované páry kotlem *HRSG*, tím zvětšuje celkovou účinnost Rankinova cyklu a tím také zvětšuje celkovou účinnost FES. Turbína *PT2* je kondenzační, pro zjednodušení uvádím na výstupu z turbíny přímo kondenzát, jelikož je kondenzátor řazen přímo za turbínou, viz příloha č.1. Pro výpočet je uvažovaná účinnost parní turbíny $\eta = 80$ [%]. Na výstupu z turbíny je sytá kapalina. Pro zadaný provozní stav je výkon turbíny $P=7245$ [kW].



Obr. 9.7 Bilance parní turbíny PT2

9.8 Bilance výměníků RGV, ROV1 a ROV2

Za kotlem HRSG je zařazena trojice výměníků, viz obr. 9.8. Úkolem výměníků je vychlazení PVS před vstupem do kondenzátoru. Do regeneračního výměníku vzduchu *RGV* je v tomto případě přiváděn vzduch o okolní teplotě $t_o = 20$ [°C] a tlaku $p_o = 1,032520$ [bar], po ohřátí je zaveden do *OSV*. Pro přehřev napájecí vody je do regeneračního ohříváku vody *ROV1* přivedena odplyněná napájecí voda o teplotě $t_{nv} = 105$ [°C], která je dále zavedena do napájecí nádrže, viz příloha č. 2. Regenerační ohřívák vody *ROV2* je zapojen jen v určitých provozních stavech oběhu FES, jedná se o výměník pro zajištění dodávky tepla. Pro jeho využití by musela být vyšší teplota PVS a tudíž i výkon plynové turbíny na PVS by musel být snížen. Pro zadaný provozní stav *ROV2* nepoužiji. Ve výpočtu regeneračních ohříváků byla uvažována ztráta sdílením tepla do okolí ve výši 5%.

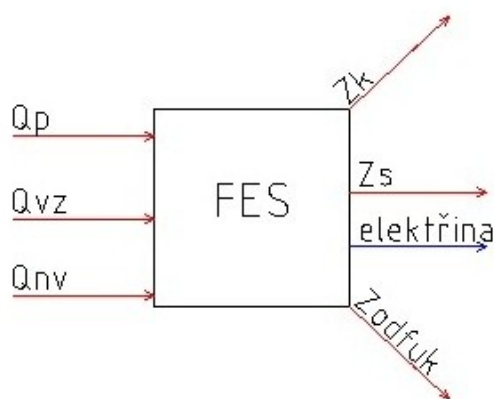


Obr. 9.8 Bilance výměníků RGV, ROV1 a ROV2

9.9 Vyhodnocení celkové energetické bilance FES

Pro výpočet celkové energetické bilance, viz obr. 9.9, jsem použil provozní stav FES, viz příloha č. 2. Parovzduchová směs za *ROV2* je přiváděna přes otevřenou armaturu *a4* do kondenzátoru *K1*. V tomto případě je armatura *a2*, *a5* uzavřena. Ochlazenou parovzduchovou směs za kondenzátorem *K1* vypouštím do okolí přes otevřenou armaturu *a1* do odfuku *O3*. Jako spalovací vzduch pro kotel *K1* používám vzduch nasávaný z okolí přes vstup *S2* a otevřenou regulační klapu *RK2*, regulační klapa *RK1* je v tomto případě zavřená.

Celkovou účinnost FES jsem vypočetl z celkového elektrického výkonu, který FES generuje, podělen příkonem do systému vstupujícím, snížený o dané ztráty. Na vstupu do FES je tepelný příkon v palivu Q_p , ve kterém je započteno i fyzické teplo paliva, dále tepelný příkon ve vzduchu Q_{vz} , který je rovněž součtem tepel přivedených do systému ve spalovacím vzduchu a vzduchu potřebném pro kompresor. A v neposlední řadě je započteno do celkové bilance teplo přivedené napájecí vodou. Uvažované ztráty, které byly odečteny od celkového příkonu, jsou ztráta citelným teplem spalin Z_k , ztráta sdílením tepla do okolí Z_s a ztráta odفukem parovzduchové směsi do okolí $Z_{odفuk}$. Celková bilance je zobrazena na obr. 9.10. Celkový elektrický výkon generovaný FES je $P_{el.} = 28757 \text{ [kW]}$.



Obr. 9.10 Celková energetická bilance

$$P_{FES,celk.} = Q_p + Q_{vz} + Q_{nv} - Z_k - Z_s - Z_{odفuk} \text{ [kW]} \quad (\text{rovnice 9.1})$$

$$P_{FES,celk.} = 1244951 \text{ [kW]}$$

$$\eta_{FES,celk.} = \frac{P_{el.}}{P_{FES,celk.}} = \frac{28757}{124495} = 0,23098 \text{ [-]} \quad (\text{rovnice 9.2})$$

$$\eta_{FES,celk.} = 23,0991 \text{ [%]}$$

10 Analýza vlivu sání spalovacího vzduchu na účinnost kotle a FESu

V této kapitole se zabývám analýzou vlivu sání spalovacího vzduchu na elektrickou účinnost FES a také na účinnost kotle. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem se v analýze vlivu sání spalovacího vzduchu na účinnost kotle zaměřil pouze na změnu komínové ztráty. Analýza byla provedena na několika možnostech nasávání spalovacího vzduchu, které jsem zobrazil na schématech, viz příloha č.1 a příloha č.2.

Jedná se o tyto tři varianty:

- a) sání spalovacího vzduchu z okolí bez přísávání PVS,
- b) sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru za kondenzátorem PVS,
- c) sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru před kondenzátorem PVS.

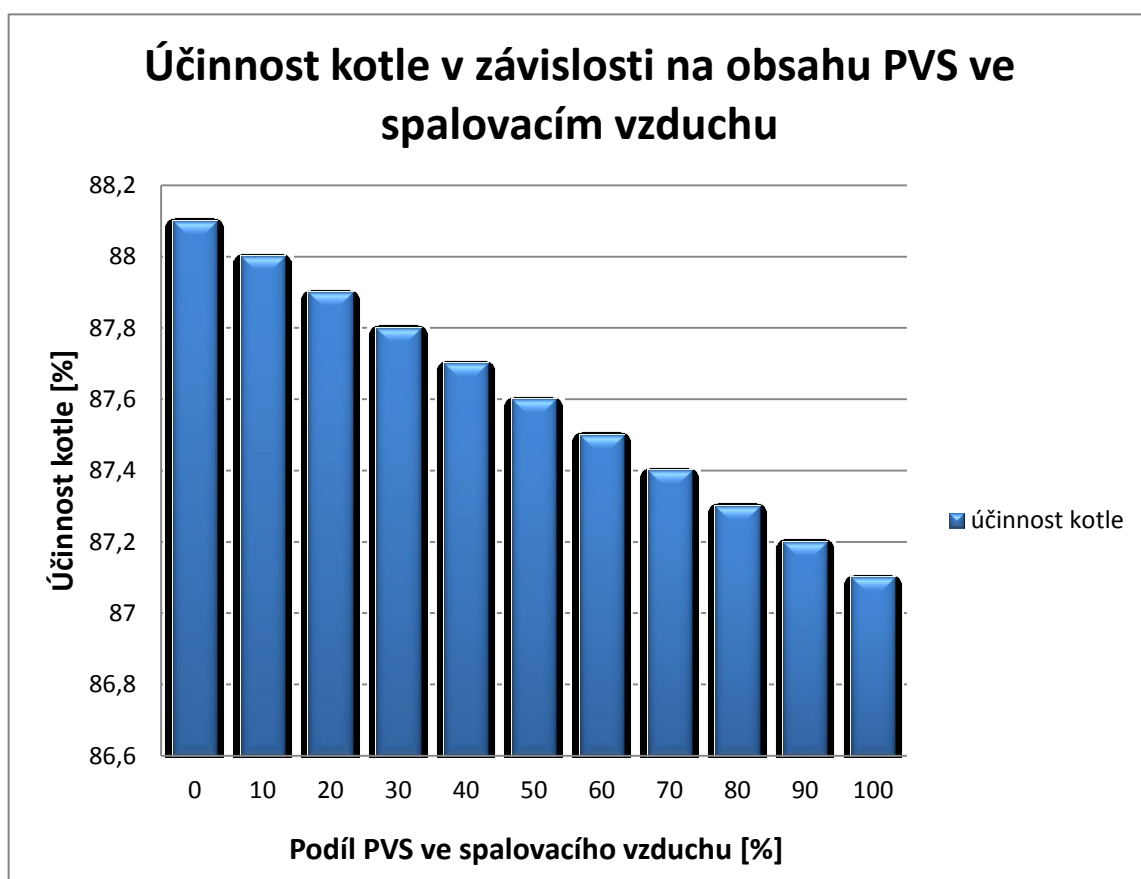
Variantu a) stanovení účinnosti FES pro nasávání spalovacího vzduchu z okolí bez přísávání PVS jsem vypočetl v kapitole 9. Tento výpočet mi určuje počáteční stav systému, na tomto základě budu porovnávat, jestli se účinnost FES, ale také velikost komínové ztráty a tím i celková účinnost kotle v důsledku přísávání PVS zvětšuje, nebo naopak zmenšuje.

Varianta b), kterou jsem znázornil v příloze č. 3, zobrazuje využití PVS jako spalovacího vzduchu do kotle za kondenzátorem *KI*. Parovzduchová směs je po částečném ochlazení vedena přes otevřenou armaturu *a2* do vzduchového ventilátoru v určitém poměru od 0 – 100 [%] objemu spalovacího vzduchu. Množství spalovacího vzduchu je regulováno regulační klapou *RKI*, která má za úkol přebytečné množství spalovacího vzduchu odfouknout do okolí.

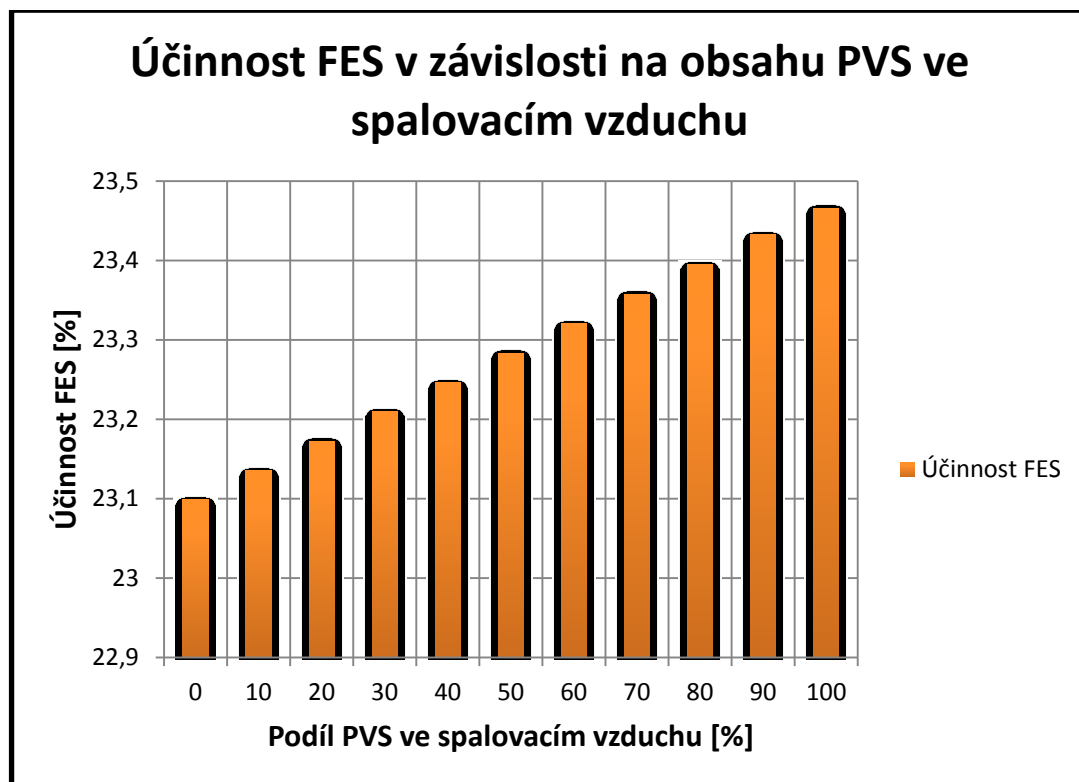
Varianta c), znázorněna taktéž v příloze č. 3, je další možností nasávání spalovacího vzduchu, které mohou ovlivnit celkovou účinnost FES. Tato varianta je řešena podobně jako varianta b) s tím rozdílem, že nasávaný spalovací vzduch přísává PVS ještě před vstupem do kondenzátoru *KI* a PVS je vedena otevřenou armaturou *a5* do vzduchového ventilátoru.

10.1 Vliv sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru ve variantě b) za kondenzátorem PVS na celkovou elektrickou účinnost FES a účinnost kotle

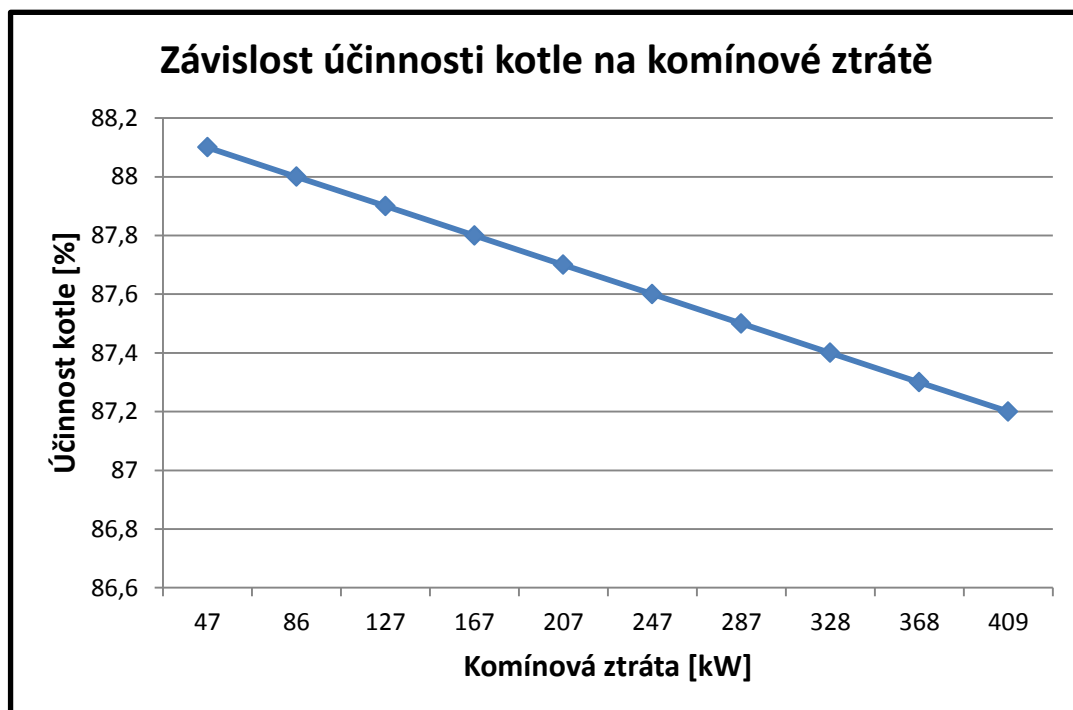
Pro stanovení vlivu sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS za kondenzátorem K1 jsem si nejprve určil počáteční provozní stav v kapitole 9, ve kterém jsem uvažoval jen s nasáváním vzduchu z okolí. Vyhodnocení jsem provedl pro postupné nasávání PVS v rozmezí 0-100 [%], vždy po 10 [%]. Teplota za výměníkem je $t_v = 40$ [°C]. První charakteristika je znázorněna na obr. 10.1. Jedná se o vliv účinnosti kotle na poměrné přísávání PVS. Dále je zde charakteristika znázorňující účinnost FES v závislosti na obsahu pvs ve spalovacím vzduchu, viz obr. 10.2. Obr. 10.3 znázorňuje pokles účinnosti kotle v závislosti na nárůstu komínové ztráty.



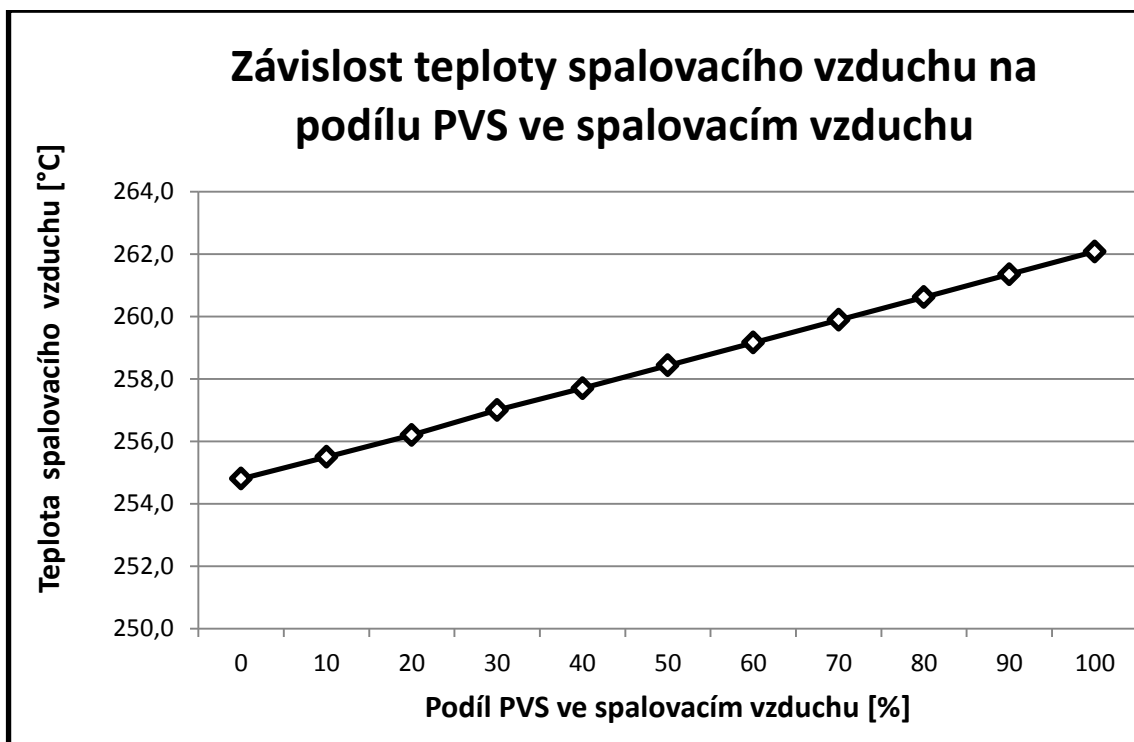
Obr. 10.1 Vliv obsahu PVS ve spalovacím vzduchu na účinnost kotle



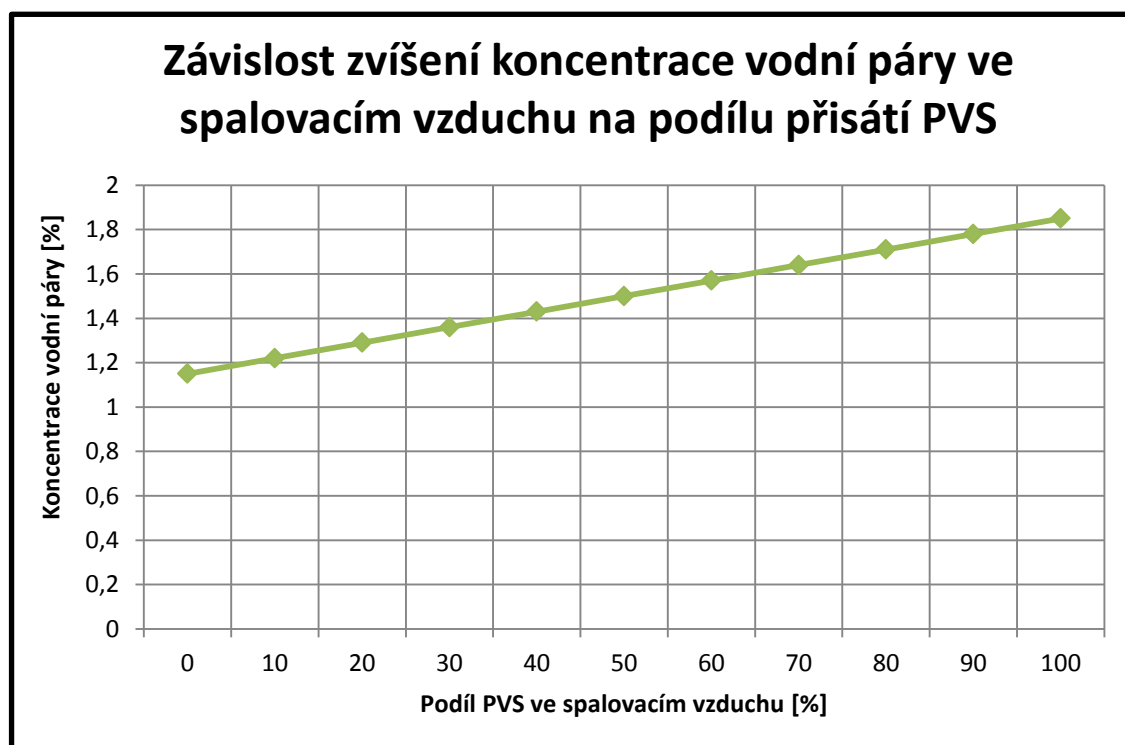
Obr. 10.2 Vliv komínové ztráty na množství PVS ve spalovacím vzduchu



Obr. 10.3 Vliv účinnosti kotle na velikost komínové ztráty



Obr. 10.4 Závislost teploty spalovacího vzduchu na podílu PVS ve spalovacím vzduchu



Obr. 10.5 Závislost zvýšení koncentrace vodní páry ve spalovacím vzduchu na podíl přísátí PVS

10 Analýza vlivu sání spalovacího vzduchu na účinnost kotle a FESu

V této kapitole se zabývám analýzou vlivu sání spalovacího vzduchu na elektrickou účinnost FES, a také na účinnost kotle. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce jsem se v analýze vlivu sání spalovacího vzduchu na účinnost kotle zaměřil pouze na změnu komínové ztráty. Analýza byla provedena na několika možnostech nasávání spalovacího vzduchu, které jsem zobrazil na schématech viz. příloha č.1, příloha č.2.

Jedná se o tyto tři varianty:

- a) Sání spalovacího vzduchu z okolí, bez přísávání PVS
- b) Sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru za kondenzátorem PVS
- c) Sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru před kondenzátorem PVS

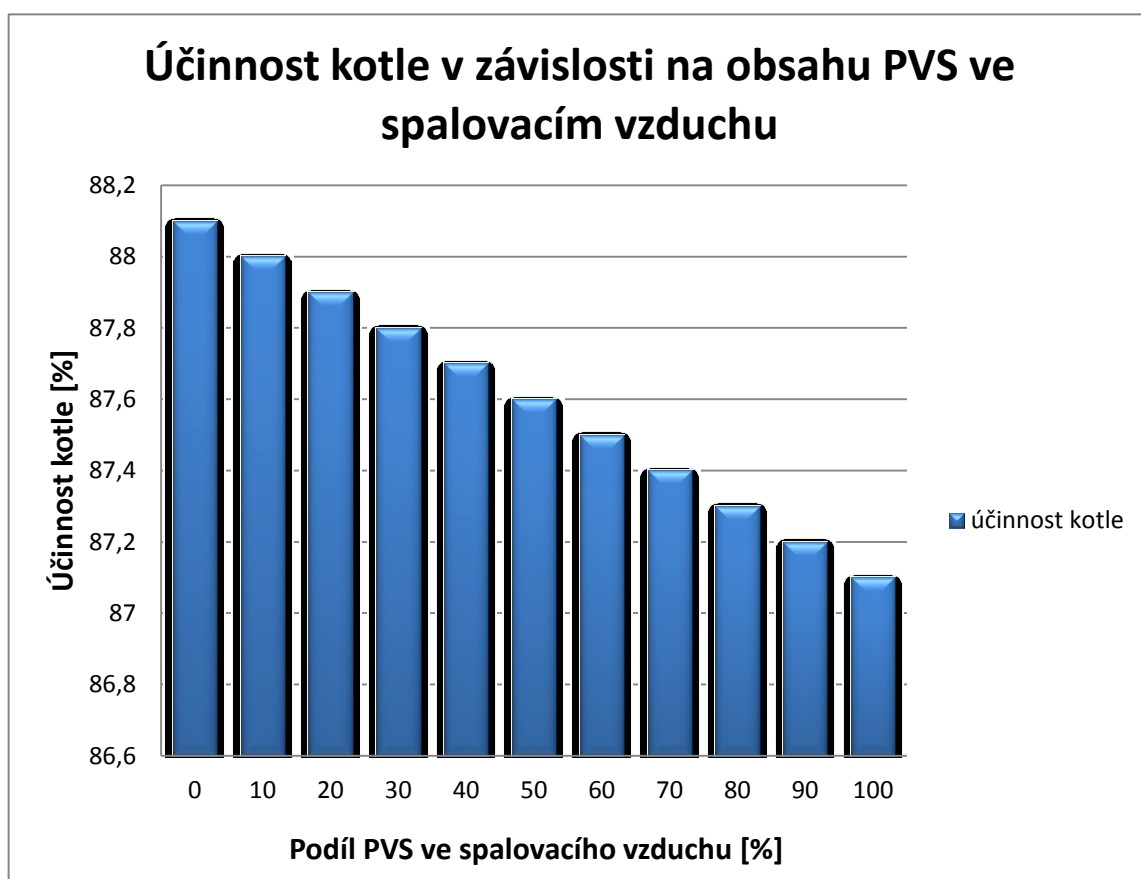
Variantu a), stanovení účinnosti FES pro nasávání spalovacího vzduchu z okolí, bez přísávání PVS jsem vypočetl v kapitole 9. Tento výpočet mi určuje počáteční stav systému, na tomto základě budu porovnávat, jestli se účinnost FES ale také velikost komínové ztráty a tím i celková účinnost kotle v důsledku přísávání PVS zvětšuje nebo naopak zmenšuje.

Varianta b), kterou jsem znázornil v příloze č. 3, zobrazuje využití PVS jako spalovacího vzduchu do kotle za kondenzátorem *KI*. Parovzduchová směs je po částečném ochlazení vedena přes otevřenou armaturu *a2* do vzduchového ventilátoru v určitém poměru od 0 – 100 [%] objemu spalovacího vzduchu. Množství spalovacího vzduchu je regulováno regulační klapou *RKI*, která má za úkol přebytečné množství spalovacího vzduchu odfouknout do okolí.

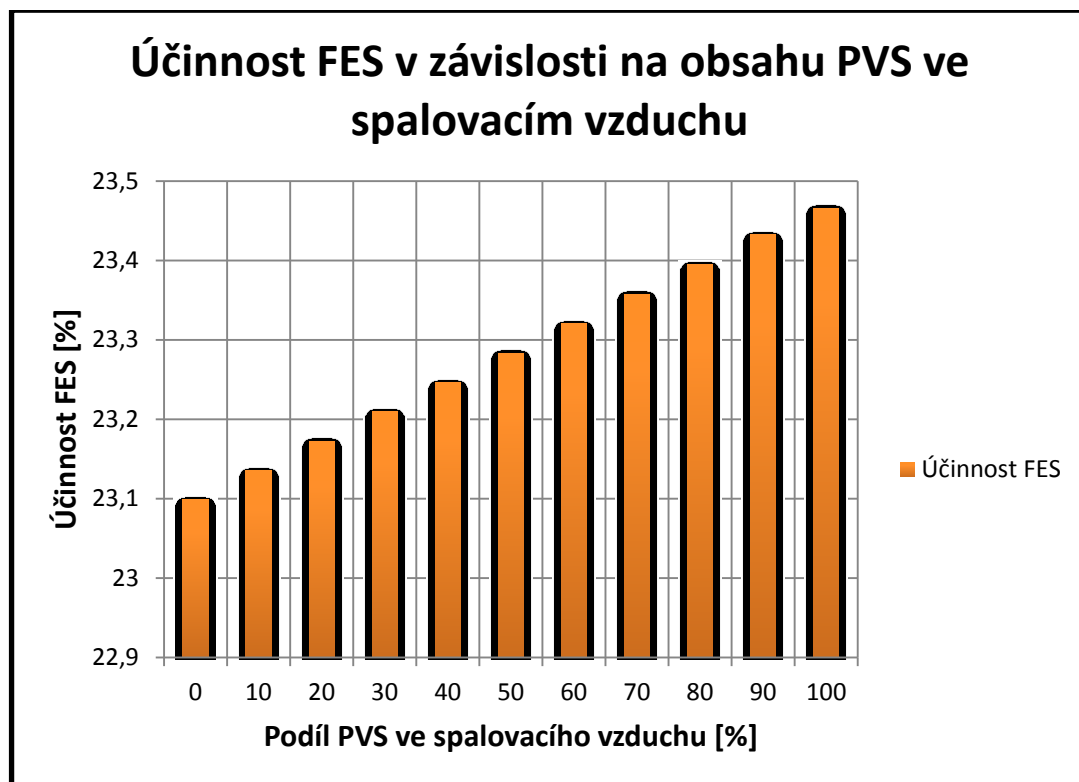
Varianta c), znázorněna taktéž v příloze č. 3, je další možnost nasávání spalovacího vzduchu, které mohou ovlivnit celkovou účinnost FES. Tato varianta je řešena podobně jako varianta b), s tím rozdílem že nasávaný spalovací vzduch přísává PVS ještě před vstupem do kondenzátoru *KI*, PVS je vedena otevřenou armaturou *a5* do vzduchového ventilátoru.

10.1 Vliv sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru ve variantě b), za kondenzátorem PVS na celkovou elektrickou účinnost FES a účinnost kotle.

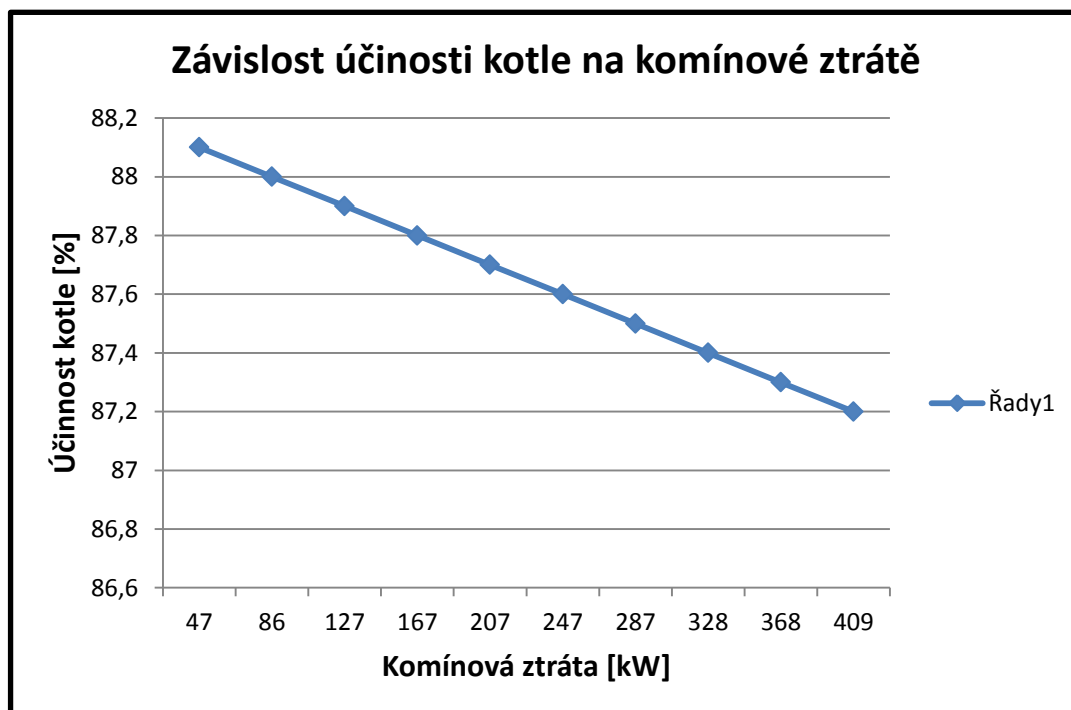
Pro stanovení vlivu sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS za kondenzátorem K1 jsem si nejprve určil počáteční provozní stav v kapitole 9, ve kterém jsem uvažoval jen s nasáváním vzduchu s okolí. Vyhodnocení jsem provedl pro postupné nasávání PVS v rozmezí 0-100 [%], vždy po 10 [%]. Teplota za výměníkem je $t_v = 40$ [°C]. První charakteristika je znázorněna na obr. 10.1, jedná se o vliv účinnosti kotle na poměrné přísávání PVS. Dále je zde charakteristika znázorňující účinnost FES v závislosti na obsahu pvs ve spalovacím vzduchu, viz obr. 10.2. Obr. 10.3 znázorňuje pokles účinnosti kotle v závislosti na nárůstu komínové ztráty.



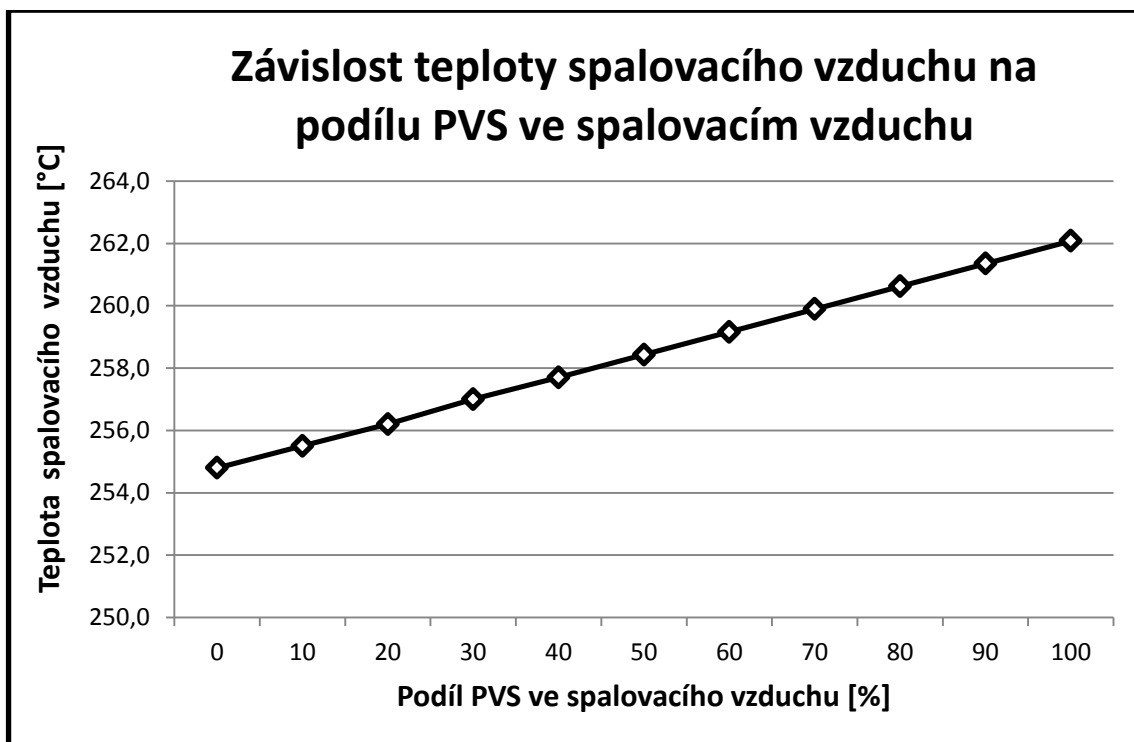
Obr. 10.1 – Vliv obsahu PVS ve spalovacím vzduchu na účinnost kotle.



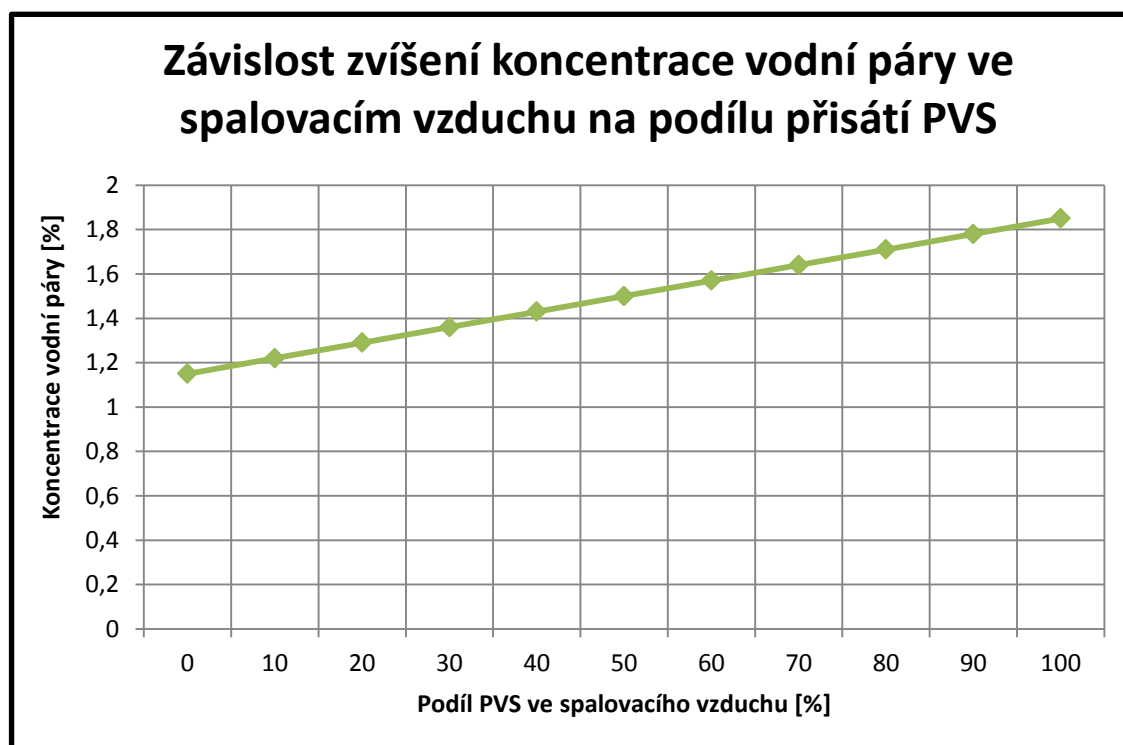
Obr. 10.2 – Vliv komínové ztráty na množství PVS ve spalovacím vzduchu



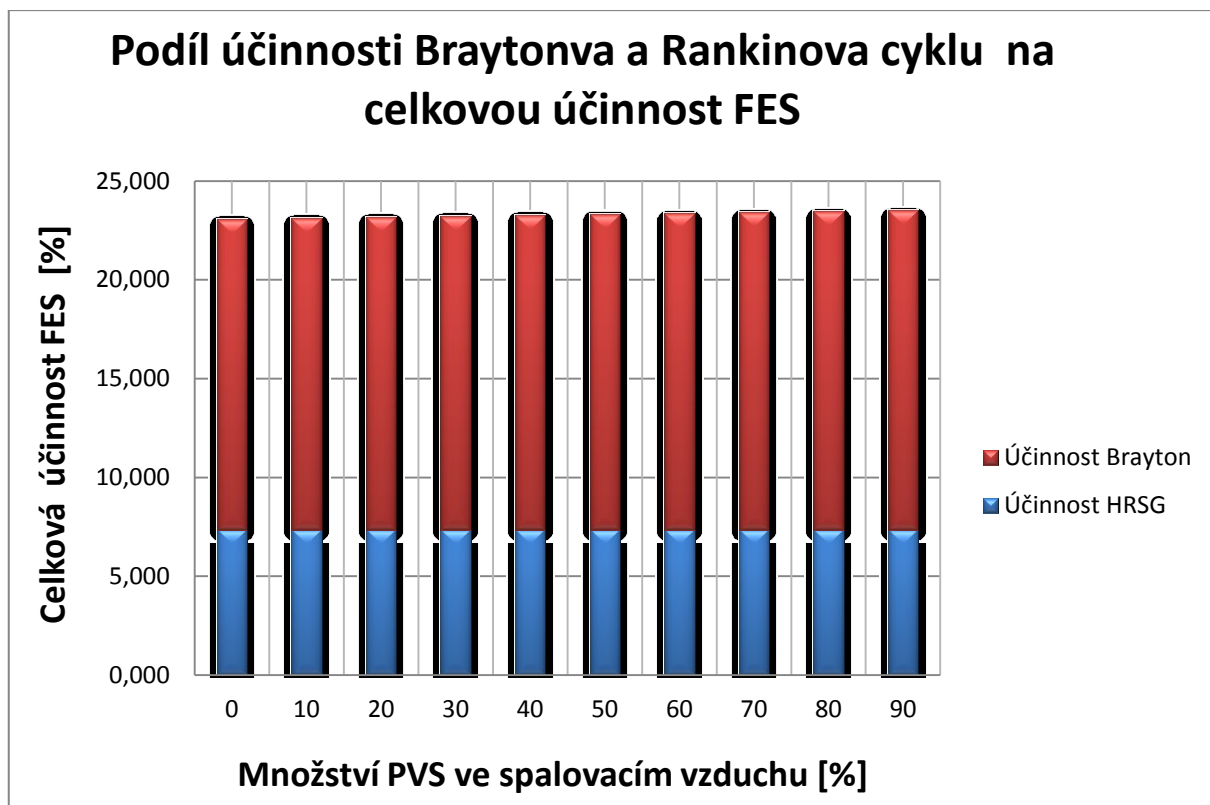
Obr. 10.3 – Vliv účinnosti kotle na velikost komínové ztráty



Obr. 10.4 – Závislost teploty spalovacího vzduchu na podílu PVS ve spalovacím vzduchu



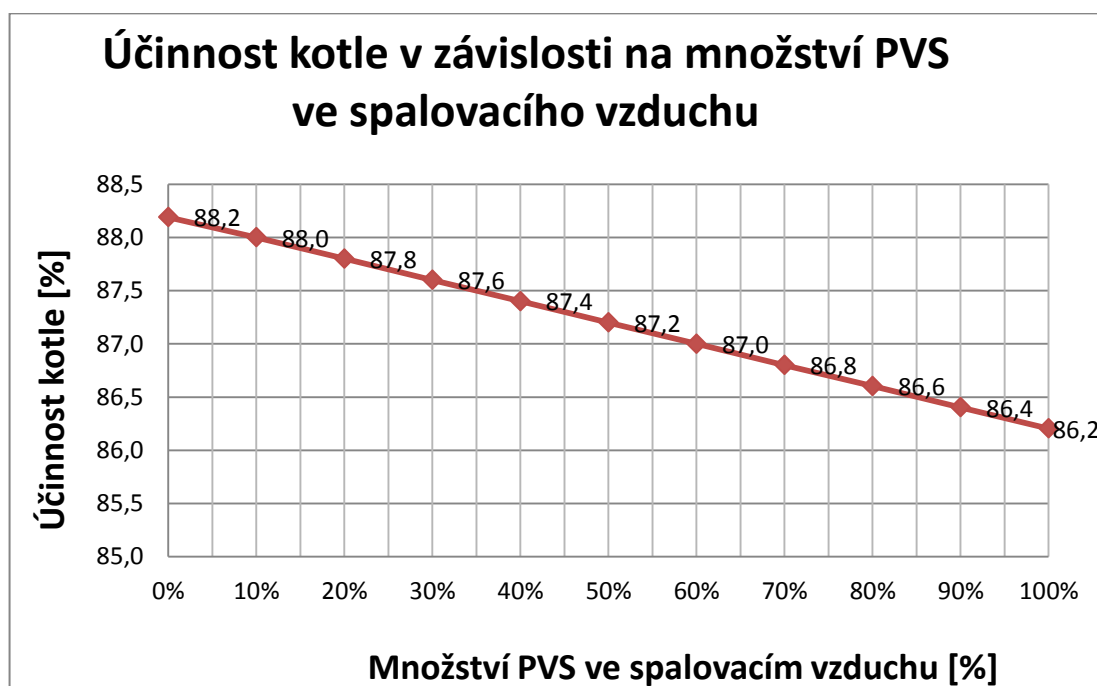
Obr. 10.5 – Závislost zvýšení koncentrace vodní páry ve spalovacím vzduchu na podíl přísátí PVS



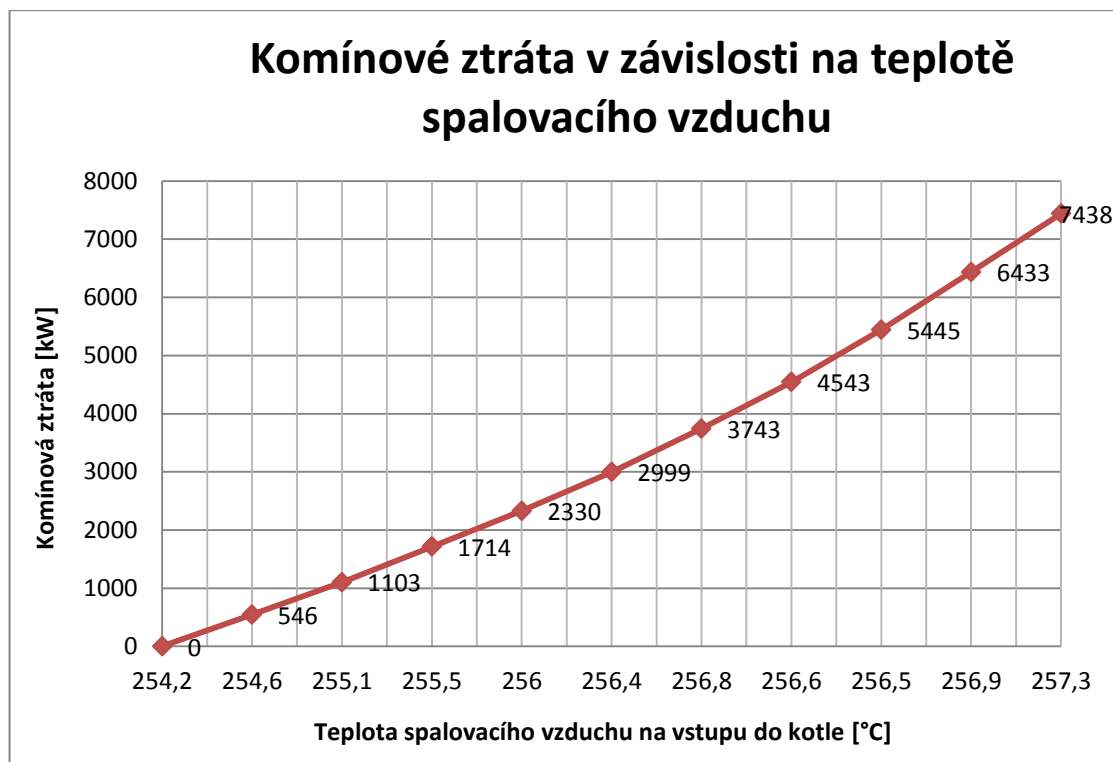
Obr. 10.6 – Podíl účinnosti Braytonova a Rankinova cyklu na celkovou účinnost FES

10.2 Vliv sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru před kondenzátorem K1, na velikost komínové ztráty a celkové elektrické účinnosti FES

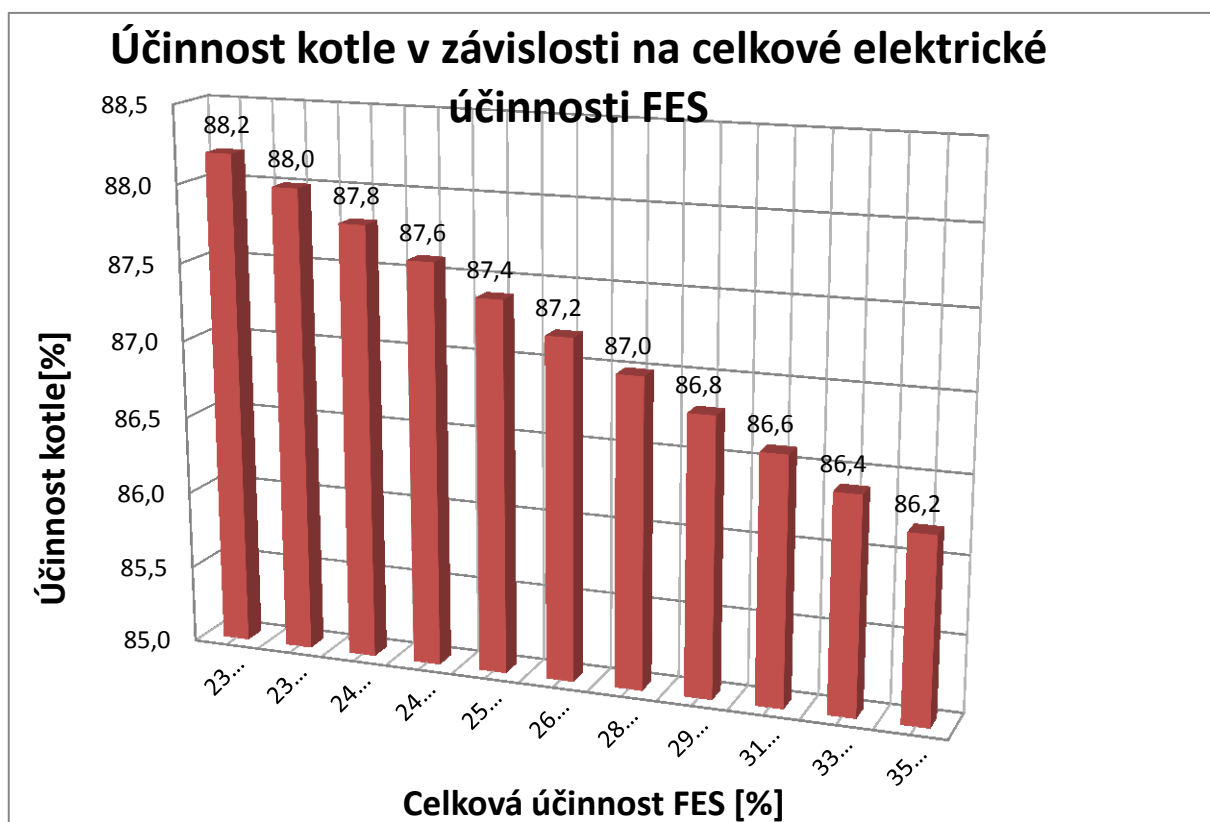
V této kapitole se zabývám analýzou vlivu sání spalovacího vzduchu s přísáváním PVS v různém poměru před kondenzátorem viz příloha č.3 varianta c). Pro tento způsob nasávání PVS bylo značné upravení výpočtového modelu, a také důkladnější odladění. Jelikož se využívá ke spalování parovzduchová směs bez odloučení vodní páry značně narůstá komínová ztráta viz Obr.°10.10. V závislosti na zvyšování množství PVS ve spalovacím vzduchu klesá účinnost kotle viz obr. č.10.7. Naopak celková účinnost FES narůstá viz obr.10.9. Zajímavé porovnání je také z hlediska rozdělení celkové účinnosti FES na Braytonův a Rankinův viz obr Obr. 10



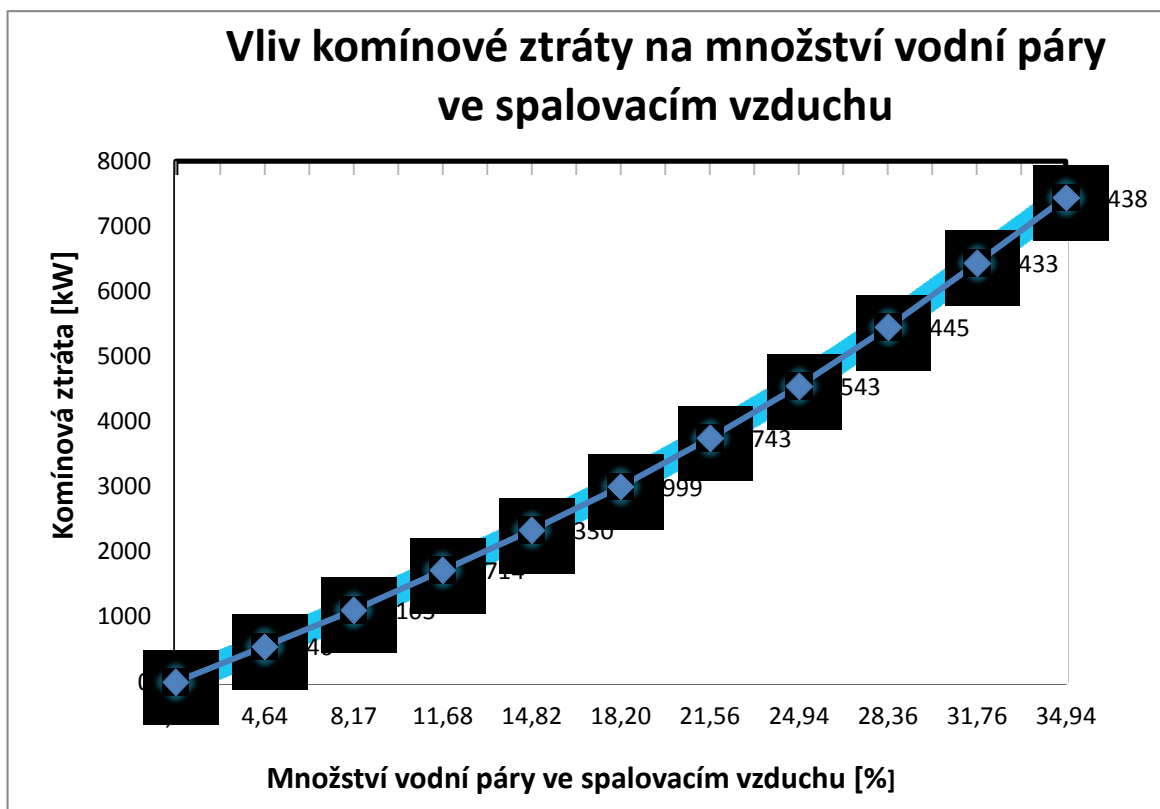
Obr. 10.7 – Účinnost kotle v závislosti na množství PVS ve spalovacím vzduchu



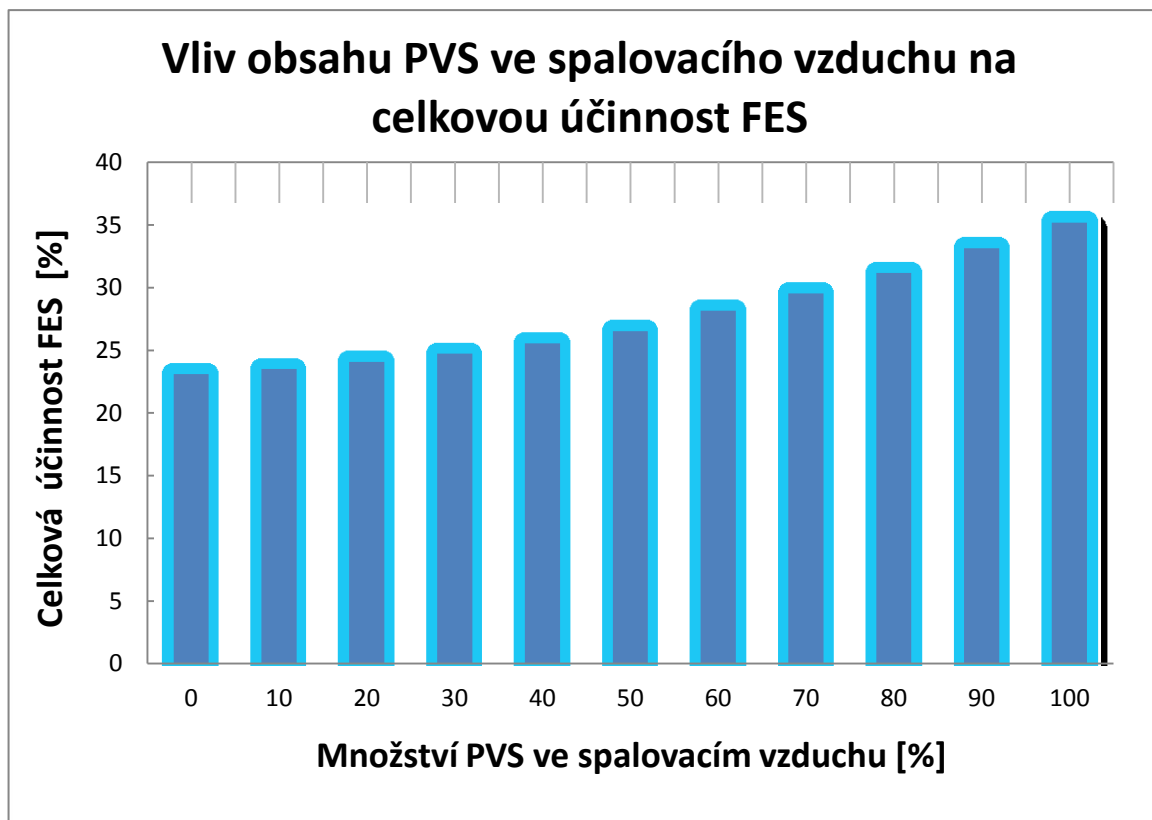
Obr. 10.8 – Komínové ztráta v závislosti na teplotě spalovacího vzduchu



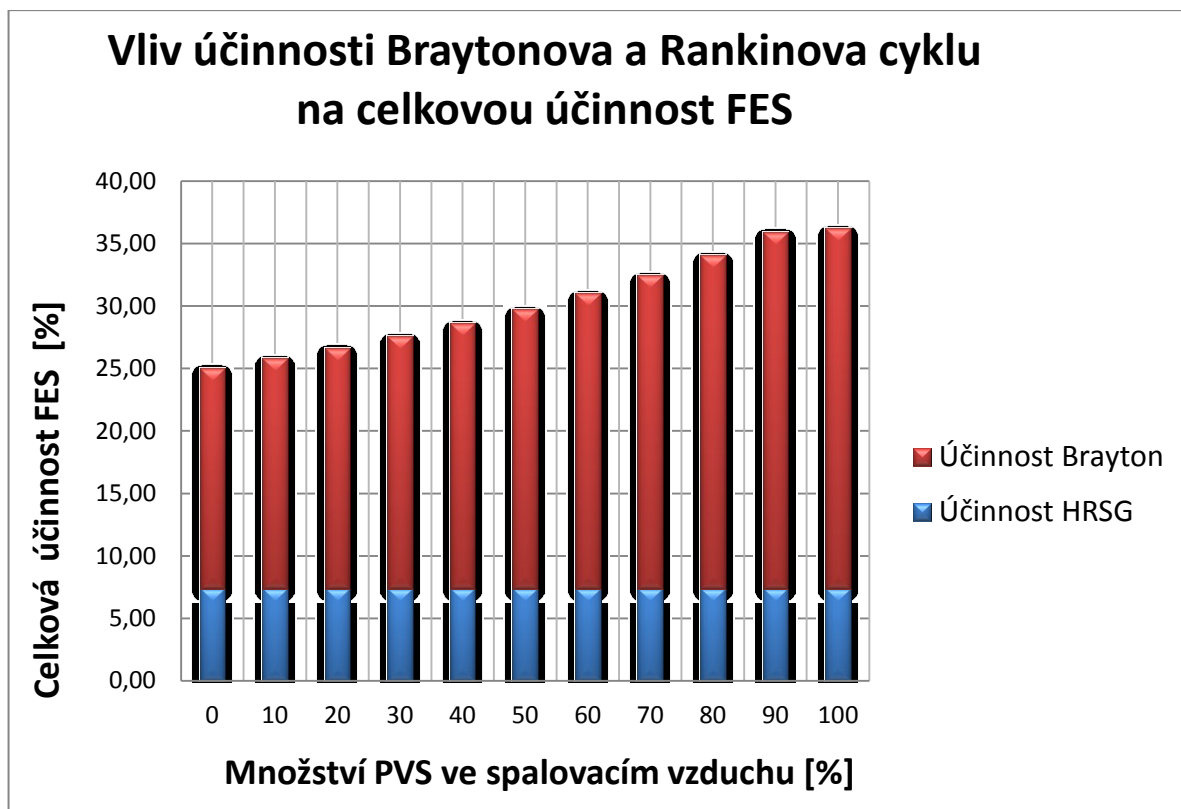
Obr. 10.9 – Účinnost kotle v závislosti na celkové elektrické účinnosti FES



Obr. 10.10 – Vliv komínové ztráty na množství vodní páry ve spalovacím vzduchu



Obr. 10.11 – Vliv obsahu PVS ve spalovacím vzduchu na celkovou účinnost FES



Obr. 10.12 – Vliv účinnosti Braytonova a Rankinova cyklu na celkovou účinnost FES

10.3 Zhodnocení Vliv sání spalovacího vzduchu s přisáváním PVS

Pro zhodnocení vlivu spalovacího vzduchu s přisáváním PVS jsem si zvolil vliv obsahu PVS na celkovou účinnost FES viz obr. 10.2 a obr. 10.11. Na těchto grafech je znázorněn vliv obsahu PVS ve spalovacím vzduchu na celkovou elektrickou účinnost FES. Na základě těchto grafů se jeví jako ideální varianta nasávání sání PVS před vstupem do kondenzátoru. V mém modelu však nejsou zahrnuty všechny důsledky tak velkého objemu vodní páry ve spalovacím vzduchu. Proto bych volil jako lepší variantu přisávání PVS do spalovacího vzduchu na výstupu z kondenzátoru. V této analýze jsem se zaměřil na elektrickou účinnost FES, je ale zřejmé že se FES bude realizovat jako kogenerační jednotka. A tím se účinnost celého FESu zvětší téměř na 70[%]. Pro ještě lepších výsledků v dosažení co největší účinnosti FESu by se nabízelo zvětšení kompresního poměru na kompresoru a tím i tlaku na výstupu.

11. Závěr

Cílem diplomové práce bylo posouzení vlivu parametrů spalovacího vzduchu na účinnost kotle, a celkovou elektrickou účinnost FESu. V teoretické části je stručně popsáno základní provedení FES, a jeho různé varianty využití. Teoretická část je doplněna o přehled kotlů vhodný pro FES.

V praktické části jsem ze zadaných hodnot vypočetl základní vlastnosti paliva pro spalování na roštovém kotli. Pomocí stechiometrických výpočtů jsem vypočetl množství spalin jejich hmotnostní tok a entalpii při zadaných teplotách. Dále jsem vypočetl účinnost roštového kotle na spalování černé uhlí pro FES, a množství paliva přiváděného do kotle. V následujících výpočtech jsem vypočetl základní parametry parovzduchové směsi pro FES. Tyto výpočty jsem dále využil pro stanovení účinnosti FES, za pomoci výpočtového softwaru EES.

Hlavní náplní mé práce bylo stanovení účinnosti FESu, pro zadaný provozní stav a následné provedení simulací nasávání spalovacího vzduchu. Pro toto posouzení jsem zvolil 3 možné varianty nasávání spalovacího vzduchu. První varianta byla nasávání vzduchu s okolí s tím že přebytečná parovzduchová směs bude odfukována do okolí a tím nebude využita. Následující varianta byla navržena tak aby bylo možné odfukovanou PVS využít pro spalování jako spalovací vzduch. V této variantě jsem zvolil nasávání PVS na výstupu s kondenzátorem PVS, a provedl bilanci pro různé poměry spalovacího vzduchu a PVS, které jsem následně graficky zobrazil. Jako poslední zvolená varianta využití PVS byla zvolena možnost odběru PVS před vstupem do kondenzátoru. Tato varianta byla taktéž vypočtena pro různé poměry spalovacího vzduchu a PVS a zobrazena v několika grafech.

Na výstupu této analýzy se jeví jako nejlepší možnost využití PVS odběr před kondenzátorem jelikož zvyšuje celkovou elektrickou účinnost FES více jak varianta odběru za kondenzátorem. Jelikož jsem však nezařadil do svého výpočtu vliv množství vodní páry ve spalovacím vzduchu, vztažený na kinetiku hoření a větší příkon ve vzduchovém i spalinovém ventilátoru doporučil bych pro využití PVS jako spalovacího vzduchu sání za kondenzátorem PVS. Součástí závěrečné práce jsou také výkresy, zobrazující zapojení FES a možnosti nasávání spalovacího vzduchu, s naznačenou regulací.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce, doc.°Ing.°Ladislavu Vilimcovi, a panu Ing. Jaroslavu Konvičkovi za spolupráci, trpělivost a čas, který mi při psaní této diplomové práce věnovali.

Seznam použité literatury

- [1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*, Praha: ČVUT, 2007. 212 s.
ISBN 978-80-01-03757-7
- [2] VILIMEC, Ladislav. *Řízení a regulace energetických zařízení*, Ostrava: VŠB, 2008. 224 s.
ISBN 978-80-248-1853-5
- [3] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I*, Ostrava: VŠB, 2002. 116 s. ISBN 80-248-0076-4
- [4] Milčák, Pavel. *Fyzikální vlastnosti parovzduchové směsi*. Ostrava, 2009. 21s.
- [5] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*, Ostrava: VŠB, 1999. 151 s. ISBN 80-7078-681-7
- [6] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí*, Ostrava: VŠB. 2005. 62 s. ISBN 80-248-0204-X
- [7] NOSKIEVIČ, Pavel. *Účinnost spalovacích zařízení*, pro předmět spalování a spalovací zařízení.
- [8] POLACH, Vladislav. *Parní kotle*, Plzeň: ZČU, 2011. 76 s.
- [9] MÍKA, Jiří. *Průmyslová energetika*, text k přednáškám, Ostrava: VŠB, 2012. 77 s.
- [10] Vítkovice power engineering a.s., *Technická specifikace díla*. Ostrava, 2011. 57s.
- [11] <http://projekty.fs.vsb.cz/414/parni-kotle.pdf>
- [12] <http://www.transformacni-technologie.cz/fosilni-paliva-jejich-vyuziti-v-energetice-a-ekologicke-dopady.html>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Schéma FES	15
Obr. 2.2 Rozdělení podle možného využití FES	16
Obr. 2.3 T-s diagram HRFES	17
Obr. 2.4 Schématické zapojení HRFES	18
Obr. 2.5 Schématické zapojení FCS	19
Obr. 2.6 Rozdělení ohnišť podle rychlosti proudění plynu [3]	21
Obr. 8.1 Schéma PVS, z literatury [4].	45
Obr. 9.1 Roštový kotel 120 [MW]	53
Obr. 9.2 Bilance OPVS	54
Obr. 9.3 Bilance ohříváku spalovacího vzduchu	55
Obr. 9.4 Redukční parní turbína PT1	56
Obr. 9.5 Bilance kompresoru s mezichladičem a plynové turbíny	57
Obr. 9.6 Bilance HRSG kotle na odpadní teplo PVS	58
Obr. 9.7 Bilance parní turbíny PT2	59
Obr. 9.8 Bilance výměníků RGV, ROV1 a ROV2	60
Obr. 9.10 Celková energetická bilance	61

Seznam tabulek

Tab. 3.1 Doporučené hodnoty maximálního poměru objemu tříatomových plynů pro pevná a kapalná paliva [2]	24
Tab. 4.1 hustota základních složek spalin	31
Tab. 4.2 hustota základních složek spalin pro t_s a p_k	32
Tab. 4.3 entalpie základních složek spalin pro t_s a p_s	33
Tab. 7.1 Náchylnost paliva k tvorbě nánosů, z literatury [5]	44

Seznam grafů

Graf 4-1 Prvkový rozbor paliva	25
Graf 4-3 Objemové složení skutečných spalin	29
Graf 5-1 Obsah spalitelných látek podle K_s , pro X_{pop} 30[%]	36
Graf 7-1 Chemické složení popela	42

Seznam zkratek

EES	Engineering equation solver (výpočtový program)
EO	Elektrostatický odlučovač
G	generátor
HRSG	Heat recovery steam generator (kotel na odpadní teplo)
ChPVS	Chladič parovzduchové směsi
CHSK	Chlazená spalovací komora
K	Kompresor
k	Kondenzátor
KN	Kondenzační nádrž
Ko	Kondenzát
KT	Plynová turbína pro pohon kompresoru
KV, SV	Kouřový ventilátor
NČ	Napájecí čerpadlo
NN	Napájecí nádrž
OPVS	Ohřívák pvs
OSV	Ohřívák spalovacího vzduchu
Pa	Palivo
PLT,GT	Plynová turbína
PO	Parní ohřívák

PT	Parní turbína
PVG	Parovzduchový gener
PVS	Parovzduchová směs
Sp	Sytá pára
Vz	Vzduch

Seznam příloh

Příloha č.1 Výpočtová procedura: výpočet entalpie PVS a spalin.

Příloha č.2 Schéma FES pro variantu a).

Příloha č.3 Schéma FES pro variantu b), c).